

ИНЖ. И. А. БУЛАВИН  
Кандидат технических наук

# ТЕПЛОТЕХНИКА В ТОНКОЙ КЕРАМИКЕ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО МЕСТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РСФСР  
М О С К В А . 1 9 3 8 . Л Е Н И Н Г Р А Д

---

Отв. редактор *А. В. Ковязин*

Научный редактор *Н. Ф. Полешук*

Технич. редактор *В. И. Вавилов*

Корректор *К. И. Леонтьев*

Ленгорлит 3207. Сдано в набор 1/VIII 37 г. Подписано к печати 5/VIII 38г. Кол. уч.-авт. л. 43,75. Кол. печ. л. 28<sup>1</sup>/<sub>2</sub> + 26 вклеек. Кол. бум. л. 18<sup>1</sup>/<sub>4</sub>. Тираж 1500. Заказ № 3152

---

Тип. им. Володарского, Ленинград, Фонтанка, 57,

## ОТ АВТОРА

Производство керамических изделий имеет тысячелетнюю историю.

Наиболее древние из до сих пор обнаруженных керамических изделий были изготовлены 12000—13000 лет назад.

Первые вручную заформованные изделия обжигались на костре — единственной в то время „тепловой установке“, обслуживавшей несложные бытовые и производственные запросы. Ограждение костра камнями для получения более высокой температуры послужило началом для постепенного дальнейшего развития напольных печей, применяющихся в кустарном промысле еще и в настоящее время.

Из напольных печей, путем постепенного усовершенствования, развились периодические однокамерные и двух- и трех-этажные печи, служившие в течение многих веков основным тепловым агрегатом для обжига, а также и для обогрева формовочных и других производственных цехов. В XIX веке однокамерные печи в грубой керамике начали вытесняться кольцевыми и многокамерными печами с перемещающимися зонами подогрева, обжига и охлаждения.

Во второй половине XIX века появились первые непрерывно действующие туннельные печи со стабильными зонами подогрева, обжига и охлаждения. Первые туннельные печи Бори, Бока, Раша и других имели ряд конструктивных недостатков, задержавших внедрение этой наиболее эффективной печи. Лишь в начале XX века туннельная печь получает признание во всех отраслях грубой и тонкой керамики и постепенно вытесняет однокамерные печи периодического действия, а также кольцевые и многокамерные печи с перемещающейся зоной горения.

В фарфоровом и фаянсовом производстве, где предъявляются весьма строгие требования к равномерности и режиму обжига, кольцевые и многокамерные печи, не обеспечивающие высокого качества фарфора и фаянса, не получили применения.

Поэтому на многих заводах круглые печи периодического действия, дающие при большом расходе топлива и тяжелых условиях работы все же высококачественную продукцию, еще сохранились и до настоящего времени. Вздорожание топлива и увеличение выпуска продукции с переходом на современные методы производства ускорили за последние двадцать лет переход с периодических печей на туннельные, облегчающие условия труда и дающие высокую производительность, непрерывно-поточный процесс обжига и экономию топлива в 2—3 раза, по сравнению с печами периодического дей-

ствия. Большинство крупных заводов Европы, США и СССР, вырабатывающих фаянс, полуфарфор и электрофарфор, успешно работают на туннельных печах.

Ряд трудностей, встречающихся при обжиге фарфоровой посуды, и некоторый консерватизм, наблюдавшийся до последних лет в этой отрасли промышленности по отношению к новому малоизученному оборудованию, послужили причиной медленного внедрения туннельных печей на заводах хозяйственного фарфора, как за границей, так и в СССР. В США, являющихся в настоящее время ведущей страной в области технологии тонкой керамики, вырабатывается почти исключительно полуфарфор и лишь весьма незначительное количество хозяйственного фарфора на нескольких мелких заводах, поэтому даже лучшие американские заводы не имеют опыта по обжигу фарфоровой посуды в туннельных печах.

В Европе заводы фарфоровой посуды в последнее десятилетие, как правило, работают с неполной нагрузкой и не имеют предпосылок для постройки новых мощных туннельных печей.

Лишь в СССР на реконструируемых, расширяемых и запроектированных новых заводах сделан первый смелый шаг и начата постройка мощных туннельных печей с производительностью до 3000 т фарфоровой посуды в год.

Параллельно с прогрессом в обжиге изделий развивается сушильная техника, и взамен естественной длительной сушки изделий на стеллажах, вводятся в эксплуатацию искусственные камерные, туннельные и конвейерные сушилки. В искусственных сушилках в несколько раз уменьшается продолжительность сушки и достигается точное регулирование процесса, что сокращает брак и снижает расход рабочей силы на обслуживание сушилки.

В течение ближайших лет в СССР закончится оборудование новых и реконструируемых фарфоровых и фаянсовых заводов новейшими сушильными и печными агрегатами разных типов и назначений. Переоборудование всех действующих заводов, связанное с перестройкой цехов, сменой перекрытий и т. п. сложными работами, требует значительного времени. Поэтому в течение ряда лет необходимо учитывать эксплуатацию устаревшего оборудования и те мероприятия, которые потребуются для рационализации этих агрегатов в целях повышения их производительности, теплоиспользования и качества выпускаемой продукции.

Разрешение предстоящих больших задач в области освоения и эксплуатации новых агрегатов, а также реконструкции существующего теплового хозяйства потребует быстрого пополнения кадров высококвалифицированных теплотехников, горновщиков, обжигальщиков, персонала по обслуживанию сушилок, вентиляционных установок и других специальностей, связанных с эксплуатацией этого оборудования в формовочных, горновых, живописных, капсельных и формолитейных цехах. Подготовка кадров проводится в трех направлениях: путем выпуска инженеров и техников с теплотехническим уклоном на силикатных факультетах вузов и техникумов, переподготовкой технического персонала и практиков на действующих заводах, и, наконец, путем ознакомления со спецификой теплоустановок фарфоро-фаянсового производства теплотехников, привлекаемых из смежных отраслей промышленности.

Крайне разнообразный профиль срочно необходимого для фарфоро-фаянсовой промышленности технического персонала обуславливает большую потребность в учебниках, пособиях и справочниках —

от пособий по техминимуму для эксплуатации несложных агрегатов до руководств и справочников для проектирования, расчета и регулирования новых сложных печей и сушилок. Между тем, если в области теплового хозяйства грубой керамики за последние годы появилось много руководств, издается специальный справочник и накопилось много ценных печатных материалов, позволяющих ориентироваться при разрешении разных технических вопросов, то тонкая керамика в этой области имеет большой пробел. Уже в текущем году остро ощущается потребность в популярных учебных пособиях для предварительного ознакомления с процессами тепловой обработки фарфора и применяемым оборудованием, руководствах по специальным вопросам проектирования и наладки печей и сушилок, настольном и карманном справочнике с нормативными материалами. Создание серии необходимых пособий и руководств для учащихся и заводских работников потребует работы многих специалистов, а по ряду тем — и коллективного труда нескольких авторов.

Приступая к работе над предлагаемой вниманию читателей книгой, автор имел в виду дать возможность учащимся и заводским работникам ознакомиться с основными процессами, протекающими при сушке и обжиге фарфора, фаянса и капселей, а также с устройством и работой сушилок, печей и применяемого вспомогательного оборудования.

По намеченному в соответствии с поставленной задачей плану и по объему книги, некоторые вопросы (топливо, процессы горения и теплопередачи) кратко и популярно изложены лишь в той части, которая нам казалась необходимой для уяснения работы сушилок, печей и мотивировки их конструкции.

Более полные сведения в этой области, так же как и более детальную характеристику печей и сушилок, читатель может получить лишь последующим изучением специальных, уже изданных и намечаемых к изданию работ.

В конце книги приложены некоторые таблицы и указатель литературы, освещающей отдельные вопросы теплообработки керамических изделий.

В заключение считаю необходимым выразить благодарность инж. А. Т. Гельману и инж. Г. А. Ковельману, предоставившим мне некоторые материалы и давшим ценные указания при просмотре рукописи. Предлагаемая книга является первой попыткой автора в области популярного изложения вопросов теплового хозяйства фарфоровых и фаянсовых заводов и потому книга не может быть свободной от недочетов.

За указание замеченных недостатков автор заранее приносит свою благодарность читателю.

*Автор*

---

## ВВЕДЕНИЕ

### Задачи теплообработки и ее значение в керамических производствах

Для удовлетворения технических и бытовых запросов керамическая промышленность выпускает весьма разнообразную продукцию. Достаточно указать на исключительную роль строительной керамики, огнеупоров и фарфора в строительстве, металлургии, электротехнике и быту, чтобы крупнейшее значение керамических производств в жизни современного общества стало очевидным.

Технологические процессы в керамических производствах имеют ряд специфических отличий, выделяющих эти производства из ряда других отраслей обрабатывающей промышленности.

В текстильной, металлообрабатывающей и других отраслях промышленности исходные материалы, как правило, сохраняют в изделиях свои основные свойства, а технологические процессы сводятся к приемам конструктивного оформления материала и его внешней отделке.

Сырые материалы, приготовленные из них керамические массы и заформованные изделия до обжига при высокой температуре порядка 1000—1400°С не имеют тех ценных свойств, которыми обладает кирпич, фарфор, фаянс и тому подобная продукция. Керамическая масса и полуфабрикаты, на изготовление которых уже затрачено много труда, не имеют до обжига ни одного из высокоценных технических достоинств готового изделия. Керамический черепок — как материал и носитель ценных технических достоинств — создается в огне при высоких температурах, и потому теплообработка приобретает в керамических производствах решающее значение. Процессы, протекающие при образовании керамического черепка, весьма сложны и многообразны. Исходные сырые материалы — каолин, пластичная глина, кварц, полевой шпат и др. — имеют, как правило, примеси разных минералов, часто мешающих производству доброкачественной продукции.

Высокие и разнообразные требования, предъявляемые к продукции, приводят к сложным сочетаниям из отдельных материалов, которые после обжига могли бы дать необходимую прочность, плотность и т. п. свойства. Отдельные элементы керамических масс (смесей) при высоких температурах взаимодействуют друг с другом. Сущность взаимодействия отдельных компонентов черепка в процессе обжига при сложных составах и условиях производственного режима теплообработки теоретически еще мало изучена.

При высоких температурах в жидкой фазе легкоплавких мате-

риалов, например, полевых шпатов, растворяются зерна более тугоплавких — кварца и глинистой субстанции; образуются химические соединения — силикаты; часто при этом происходит выделение из сплава кристаллических образований и целый ряд других физико-химических явлений, активно протекающих при высоких температурах, но до сих пор еще не вполне изученных.

Все сложные процессы взаимодействия составных элементов массы в основном зависят от температуры, продолжительности и порядка (режима) нагрева изделия и, в свою очередь, определяют свойства получаемого черепка как продукта, отвечающего той или иной потребности. Влияние продолжительности и конечной температуры обжига являются решающими при установлении производственных методов предшествующей обработки, и в некоторых случаях режим обжига предопределяет вид и класс изделий более резко, чем состав применяемых масс.

Ряд керамических масс, применяемых в производстве фаянса, может дать высококачественную каменную посуду при более высоких температурах обжига.

Обжигая фарфоровые массы при более низких температурах, можно получить черепок, по техническим качествам и внешнему виду мало отличающийся от фаянса.

Повидимому, недостаточный учет тепловой обработки изделий является причиной распылчатости в классификации керамических изделий на основании их химического состава.

Вопрос о производстве изделий, отвечающих определенным техническим условиям, теперь уже не может предрешаться подбором масс из намеченного сырья для принятых в этой области температуры и продолжительности обжига.

В настоящее время довольно ясно вырисовываются более сложные задачи с преобладанием факторов экономического порядка.

Продолжительность, режим и конечная температура сушки и обжига определяют пропускную способность сушилок, печей и предприятий в целом, следовательно, и объем капиталовложений в керамическую промышленность и эффективность производства.

Более глубокое изучение службы готовых керамических изделий в эксплуатации уже показало большие колебания в их долговечности, определяющие объем выпуска продукции для полного насыщения потребности.

Если к этому добавить, что от частой смены износившейся керамики, например в металлургии или в высоковольтных электропередачах, возникает целый ряд дополнительных расходов, то пересмотр всех методов керамического производства с целью увеличения продолжительности службы керамической продукции становится весьма актуальной задачей. Для обеспечения наибольшей устойчивости и других высоких качеств часто применяют массы, требующие высокой температуры обжига.

К сожалению, высокие температуры в керамических производствах до последних 20—30 лет получались с большими затруднениями и за счет увеличения продолжительности обжига, резкого понижения пропускной способности печей и высокого расхода топлива. Здесь перед теплотехникой поставлена ответственная задача изыскания методов дешевой теплообработки при высоких температурах и таких же коэффициентах полезного действия. В некоторых областях уже имеются конкретные решения и конструкции, а в других только лишь намечаются основные вехи и пути.

В перспективе предстоит более широкое применение и освоение в ряде отраслей керамического производства так называемых „заменителей“ высококачественного сырья. Как правило, заменители имеют довольно пестрый состав со значительным содержанием окислов железа и щелочно-земельных, а также остатков обломочных пород самого разнообразного состава. Не вдаваясь здесь в детали этого вопроса, необходимо отметить, что при использовании заменителей получается усложнение состава массы за счет введения легкоплавких компонентов, способных к образованию многочисленных эвтектик с низкой температурой плавления. Практически эти массы в обжиге имеют очень небольшой интервал между началом спекания черепка и плавлением, вызывающим деформацию и брак продукции. Работа по эффективному освоению заменителей в целях большей успешности должна вестись в двух направлениях: керамиками — в области подбора масс с достаточно большим интервалом температуры (порядка 100—150° С) от начала спекания до заметных деформаций формы, а теплотехниками — в области усовершенствования конструкции печей, которые при высокой пропускной способности в одном агрегате давали бы ровную температуру по всем сечениям загрузки (с разницей не выше 20—30° С).

Особого внимания в практической работе по теплотехнике заслуживают противоречия, встречающиеся в некоторых процессах керамического производства, например: преимущества пластичных материалов в формовке и дефекты от большой их усадки в сушке, а иногда и в обжиге, разнородное влияние крупности размолла материалов на сушку изделий и структуру черепка после обжига, а также некоторые другие. При изучении технологии керамических производств, вопросам тепловой обработки, занимающим в производстве доминирующее положение, должно уделяться наибольшее внимание, так как в процессах измельчения сырья, приготовления массы и оформления преобладают, по существу, элементы механической обработки, при освоении которых широко используются знания, накопленные в других отраслях обрабатывающей промышленности (рудообогатительной, цементной, стекольной, пластических масс и т. п.).

Огнеупорные и строительные керамические материалы — фарфор, фаянс, кислотоупорная керамика — становятся фабрикатами только лишь после обжига, определяющего, в конечном счете, все их основные качества. Поэтому установление условий тепловой обработки, дающей с наименьшими затратами продукцию высокого качества, является одной из ведущих проблем керамической технологии.

Конечная цель керамического производства — изготовление изделий, удовлетворяющих всем техническим или бытовым требованиям.

Технические требования можно разделить на три группы:

- 1) соблюдение заданной формы и размеров изделия;
- 2) получение черепка необходимой устойчивости против механических, термических, химических и других воздействий;
- 3) красивый внешний вид и цвет изделий для продукции бытового назначения.

Выполнение требований первой группы предreshается предварительными работами конструктора (а иногда и художника), а также в процессе оформления изделий.

Неправильно проведенная тепловая обработка, обычно, влечет изменение формы изделия с искажением основных его размеров и поэтому может свести на-нет всю работу в предыдущих стадиях производства.



Выполнение разнообразных требований 2-й и 3-й групп в отношении качеств черепка и глазурного покрова определяется целиком двумя взаимно связанными факторами: подбором состава массы и глазури и установлением соответствующего режима теплообработки.

Обычно более или менее твердо установленными являются характеристики требуемых изделий, для которых регламентируется известный качественный минимум. Изделия, не удовлетворяющие минимуму, являются браком, который идет на второстепенные нужды по пониженным ценам или в бой в качестве отходов производства.

Повышение качества продукции за пределы установленного минимума является, как с общегосударственной точки зрения, так и в условиях соревнования отдельных предприятий, весьма рентабельным и оправдывает дополнительные расходы на сырье, топливо и обработку.

Определение наиболее удачного состава массы и наивыгоднейшего режима сушки и обжига изделий довольно легко разрешается в тех случаях, когда по характеру выпускаемой продукции уже предопределяется одно из неизвестных, например, конечная температура обжига (следовательно, и его стоимость) или исходные сырые материалы, территориально связанные с заводом, как это имеет место в производстве кирпича, черепицы и т. п.

Задача значительно усложняется, когда с изменением состава массы, например, введением более легкоплавких компонентов, при пониженной температуре обжига нужно получить изделия аналогичного качества.

В этом случае вопрос окончательно решается экономическим расчетом изменений в стоимости массы, обжига и других производственных операций на основе полузаводских опытов.

Применение более легкоплавких масс дает понижение конечной температуры обжига, значительную экономию топлива, увеличение выпуска и ряд других преимуществ; с другой стороны, несколько повышается стоимость массы и выход деформированной продукции (боя).

Найти наивыгоднейший состав массы и соответствующий режим обжига, которые дали бы наиболее низкую себестоимость продукции при соблюдении требований стандарта, — составляет ответственную и благодарную задачу для совместной работы керамика, теплотехника и экономиста.

Решение вопроса в данном случае может быть выражено рядом графиков, показывающих изменение отдельных элементов себестоимости в зависимости от намеченных вариантов состава массы и режима обжига.

Построением сводного графика путем наложения кривых можно получить результирующую кривую, характеризующую выгодность или убыточность намеченного технологического процесса.

Приведенная схема проработки производственной рецептуры и установления режима сушки и обжига является одной из простейших. Приведенные соображения имеют целью показать взаимную связь двух важнейших элементов производства — рецептуры и теплообработки, сложность вопроса и необходимость его разрешения до конечного результата, т. е. до техно-экономического оптимума — минимальной себестоимости при стандартном качестве продукции.

Изыскание наиболее выгодных условий сушки и обжига в производственных условиях является весьма сложной задачей. При лабораторных испытаниях масс изготавливаются небольшие образцы в виде

плиток, для которых путем опытов устанавливается конечная температура сушки и обжига, а также продолжительность и режим теплообработки, при которой из массы получается черепок, удовлетворяющий заданным техническим требованиям.

Так как условия опытной сушки и обжига пробной массы часто весьма далеки от их осуществления в производственной обстановке, то установленный режим сушки или обжига характеризует только теоретическую возможность образования черепка в идеально обставленных условиях.

Полученные при испытании проб данные характеризуют массу как таковую с точки зрения наибольших возможностей, которые теоретически можно получить от этой массы.

На основании лабораторной теплообработки можно сравнить разные составы масс и сделать выводы об их пригодности для намеченного производственного использования.

Лабораторные данные о желательном режиме сушки и обжига исследуемых масс при использовании в производственных условиях должны уточняться на основе дальнейших полужаводских опытов и в соответствии с условиями массового производства тех или иных изделий.

В зависимости от величины, толщины черепка и геометрической конфигурации изделий время прогрева изделий и продолжительность отдельных фаз сушки и обжига значительно удлиняются по сравнению с периодами, установленными для пробных плиток.

Большое разнообразие в свойствах основных сырых материалов, размерах и форме изделий не позволяет установить простую закономерность, связывающую размеры изделий с продолжительностью отдельных фаз теплообработки. Поэтому режим обработки изделий устанавливается, обычно, экспериментальным путем в заводских установках или же в опытных установках, приближающихся по условиям работы к нормальному заводскому оборудованию.

Испытания в промышленных печах и сушилках проводятся довольно быстро и обходятся, обычно, дешевле, чем в установках, специально построенных для полужаводских опытов, но имеют тот крупный недостаток, что менять режим работы производственного оборудования для выявления наиболее выгодного режима обработки опытной партии изделий, обычно, нет возможности. Испытания масс и новых видов изделий в условиях установившегося режима заводских установок позволяют установить лишь пригодность этого режима для обработки новых масс или изделий; подбор же наиболее выгодных по времени и расходу тепла приемов обработки производится в специальных опытных установках, где возможно широкое регулирование условий сушки или обжига без риска испортить большие количества продукции в самом производстве.

Этими экспериментальными работами окончательно выявляется режим теплообработки для изделий заданного типа и состава массы, наиболее выгодный с точки зрения технологического процесса.

Необходимо, однако, отметить, что этот режим является ведущим заданием при разработке проектов и эксплуатации печей и сушилок; однако часто действительная работа тепловых установок имеет некоторое отступление от оптимальной с технологической точки зрения. Чем менее разрыв между желательным режимом теплообработки и режимом, выполненным в заводской установке, тем удачнее ее конструкция и методы эксплуатации по сравнению с другими

установками (при одинаковых других показателях — расходе тепла, удобстве обслуживания и т. п.).

Приведенный выше схематический обзор задач, стоящих перед работниками керамической промышленности по установлению рациональных режимов сушки и обжига и выбору эффективного оборудования, дает некоторое представление о масштабах работы в области теплотехники фарфоро-фаянсового производства и тех проблемах, которые придется разрешать теплотехникам и керамикам в лабораториях и на производстве.

---

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ СУШКЕ И ОБЖИГЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

С каждым годом увеличивается ассортимент изделий керамической промышленности и усложняются предъявляемые к ним технические требования.

Несмотря на разнообразие составов керамических масс и приемов их обработки, во всех керамических производствах основным процессом остается тепловая обработка — сушка и обжиг, с помощью которых механическая смесь сырых материалов превращается в прочный черепок с высокими техническими достоинствами. Физико-химические явления, протекающие в керамической массе в период сушки и обжига, определяют качество вырабатываемой продукции и потому имеют решающее значение в производстве.

Глина, каолин, кварц, полевой шпат и другие компоненты керамических масс под влиянием высоких температур и внешней газовой среды претерпевают разнообразные изменения и образуют ряд новых химических соединений и сплавов с весьма разнообразными физическими и химическими свойствами.

Изучение явлений, протекающих при обжиге керамических масс, связано с рядом затруднений, в использовании при высоких температурах точных методов научного исследования, поэтому в этой области имеется и в настоящее время много неизученного и объясняемого гипотетическими недостаточно обоснованными предположениями.

Тем не менее, в результате научных исследований установлены изменения отдельных компонентов керамических масс при их нагревании и всесторонне изучены двойные и тройные системы  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и разных плавней, чем заложен прочный фундамент керамической технологии.

#### I. Сушка каолинов, глин и керамических масс (при нагревании до $100^\circ\text{C}$ )

##### 1. Цель сушки

Тепловая обработка глин, каолинов и керамических масс, обычно, начинается с процесса сушки, задачей которого является удаление механически связанной влаги до установленных норм.

Просушка глин и каолинов применяется перед измельчением в порошок в разных отраслях огнеупорной керамики; обжиг глин также начинается с их просушки.

Глины и каолины составляют основную часть почти во всех керамических массах и в наибольшей степени определяют важнейшие их свойства, поэтому изучению превращений глинистой субстанции и промышленных глин в процессах сушки и обжига должно уделяться большое внимание.

Керамические изделия оформляются из пластичных масс, содержащих довольно высокий процент воды (за исключением слабо увлажненного порошка для прессовки), и потому получают надлежащую прочность и неизменность форм лишь после предварительной просушки.

Кроме воды, механически распределенной между частицами глинистого вещества и отощающих материалов, в глинах, каолинах и некоторых других силикатах имеется химически связанная, так называемая гидратная вода. Удаление из масс гидратной воды происходит в обжиге при довольно высоких температурах, тогда как испарение механически распределенной влаги или сушка изделий производится при температурах, обычно, не превышающих  $100^{\circ}\text{C}$ . В заводских условиях процесс сушки осуществляется или на открытых стеллажах с естественной циркуляцией, или же в специальных сушилках с регулированием температуры, влажности и обмена воздуха.

Во всех случаях сушка не доводится до полного удаления влаги и по соображениям экономического порядка заканчивается, когда полученная степень обезвоживания дает вполне прочные изделия и обеспечивает сохранение формы и целостность изделий в процессе обжига при окончательном удалении остатков гигроскопической влажности.

Прочность изделий в высушенном состоянии обусловлена связывающей способностью вводимых в массу глин и каолинов и силой сцепления мельчайших частиц глинистого вещества.

Природные свойства используемых глин и каолинов, количество и крупность помола отощающих массу добавок (кварца, шамота, полевого шпата и т. п.), количество воды в массах и форма изделий определяют степень их прочности после предварительной сушки. Линдсей и Водлей<sup>1</sup> приводят в диаграммах результаты своих исследований прочности двух глин и полуфарфоровой массы при разных процентах остаточной влаги (к сухому весу).

Как видно из диаграмм (рис. 1, 2 и 3), прочность высушиваемых образцов значительно возростала при удалении последнего процента влаги.

Образцы, высушенные до постоянного веса при  $110^{\circ}\text{C}$  (в атмосфере с 4% относительной влажности), при хранении в течение нескольких недель в обычной комнатной атмосфере получили гигроскопической влаги:

Масса полуфарфора . . . . .	0,7%
Сланцевая глина . . . . .	0,7%
Пластичная глина . . . . .	2,5%

Очевидно, что удаление влаги ниже воздушной гигроскопии в производственной обстановке не целесообразно, так как достигнутая высокая прочность изделий все равно будет потеряна при хранении их на воздухе.

<sup>1</sup> Lindsay and Wadleigh. Journ. of the Amer. Cer. Soc., 11, 1925,

Установление кривой прочности изделий и остаточной влажности при сушке имеет особо важное значение в тонкой керамике, где бой изделий при сушке, оправке и других операциях составляет весьма существенную потерю производства.

Сопоставление диаграмм показывает повышение прочности необожженного черепка при повышении содержания в них глинистых пластичных материалов, однако при использовании последних имеются известные пределы, так как одновременно с повышением прочности сырого черепка весьма затрудняется процесс удаления влаги, увеличивается усушка, коробление и растрескивание.

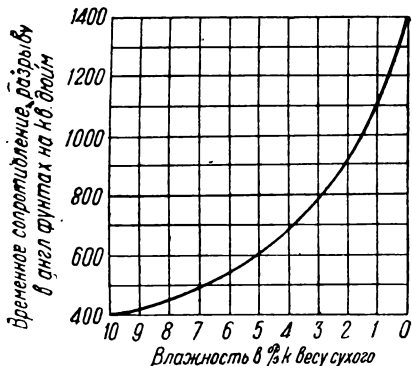


Рис. 1. Диаграмма прочности высокопластичной глины в зависимости от влажности

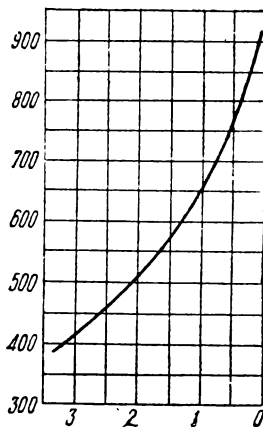


Рис. 2. Диаграмма прочности сланцевой глины в зависимости от влажности

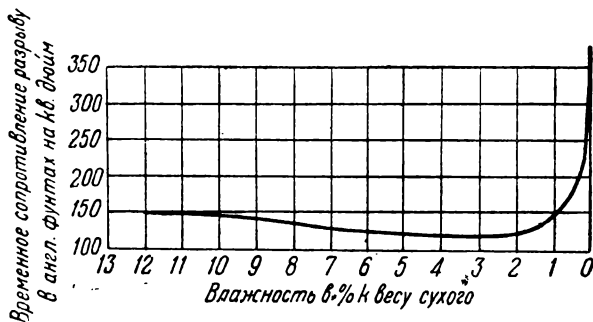


Рис. 3. Диаграмма прочности массы полуфарфора в зависимости от влажности

Изучение скорости испарения влаги с поверхности, ее продвижения по капиллярам из внутренних слоев, а также зависимости между потерей влаги и усадкой является необходимой предпосылкой для установления наиболее выгодного режима сушки и проектирования сушильного оборудования.

Для выявления свойств и поведения в сушке сырых материалов, рабочих масс и отдельных изделий в лабораторных условиях пользуются сушильными камерами с оборудованием для широкого и, по возможности, автоматического регулирования температуры и влаж-

ности среды, циркуляции воздуха, а также и точного контроля изменений, происшедших в испытуемых образцах или изделиях.

На рис. 4 в виде примера показан продольный разрез сушильного шкафа Керрера.

Внутри камеры на стеллажах размещаются исследуемые образцы 3. В центре камеры установлен микрометр 2 для непрерывного наблюдения усадки контрольного образца. Образец помещается между двумя измерительными головками, снабженными шкалой с точностью до 0,01 мм.

Второй аналогичный образец в процессе сушки может одновременно взвешиваться на чашке весов 1, установленных на шкафу и позволяющих непрерывно учитывать потерю влаги во взвешиваемом образце. Одновременное наблюдение потери влаги и усушки позволяет установить связь между этими явлениями в наиболее ответственные периоды сушки.

Для точных исследований иногда пользуются пружинными весами, в которых отклонение чашки с помощью зеркала фиксируется через оптические линзы на крупную шкалу, и потому можно получить весьма точное, удобное и непрерывное взвешивание.

В сушильной камере циркулирует воздух, нагнетаемый расположенным внизу вентилятором 4.

Перед всасывающей трубой вентилятора воздух подогревается электрическими нагревательными элементами 5. Часть влажного воздуха удаляется из камеры в атмосферу, а остальная — через нагреватель вентилятором возвращается в камеру. Для увлажнения воздуха установлен распылитель воды. Скорость движения воздуха в камере регулируется путем открытия заслонки или изменением числа оборотов вентилятора.

Для регулирования температуры в камере установлен термостат (автоматический регулятор), управляющий включением электрических нагревательных элементов.

Влажность атмосферы также автоматически удерживается в намеченных пределах специальным регулятором влажности, шелковая нить которого помещена в камере в точке 6. Длина нити меняется с изменением влажности и, таким образом, регулятор влажности автоматически управляет работой водяного распылителя.

Автоматические регуляторы позволяют удерживать в сушильном шкафу заданную температуру в пределах колебания  $\pm 1^\circ\text{C}$  и отклонение влажности в пределах 3%.

Отмеченное оборудование опытной сушилки дает возможность установить и регулярно поддерживать любой режим сушки с непрерывным наблюдением за изменением высушиваемых образ-

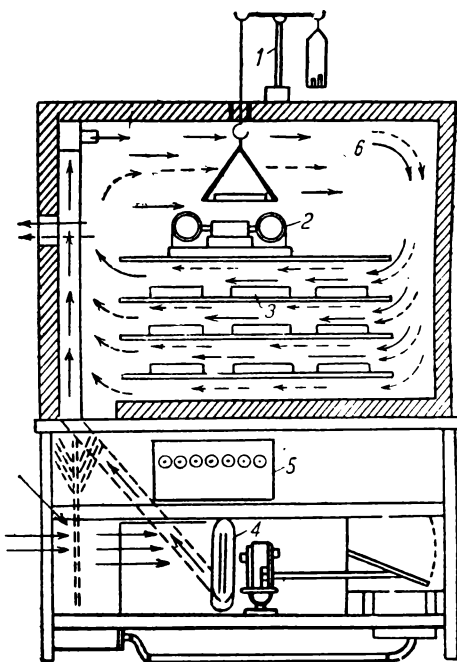


Рис. 4. Экспериментальный сушильный шкаф Керрера

цов, что позволяет вести разнообразные исследования в области сушки.

Можно пользоваться и более простыми сушильными камерами, но самое исследование при этом весьма усложняется в части регулирования условий сушки и разных измерений.

Экспериментальными работами ряда исследователей (В. Боден и Б. Гайяр, А. Бляйнингер, Арон, Р. Мак-Майкель, Р. Рике и др.) в настоящее время с достаточной ясностью установлена сущность процесса сушки. В результате этих работ получены характеристики для ряда глин и каолинов.

## 2. Усадка керамических масс при сушке (усушка)

Известно, что вода, механически введенная при затворении теста из глины, каолина и керамических масс, так называемая „влага, придающая пластичность“, в зависимости от количеств имеет разное влияние на процесс сушки.

Определенная часть воды обволакивает частицы глинистой субстанции и отошающих материалов и размещается в промежутках между ними. При этом содержании воды, отдельные частицы глины или масс еще не могут отделиться друг от друга.

Эта часть воды называется „порозной влагой“. Для каждого вида глин и масс имеется определенный предел порозной влаги: дальнейшая прибавка воды уже разделяет частицы и способствует увеличению объема затворенного теста. При сушке глин и масс, содержащих только порозную влагу, размеры образцов и отформованных изделий не уменьшаются.

Удаление при сушке воды, введенной сверх нормы порозной влажности, сопровождается сокращением размеров—усадкой, поэтому эта часть механически распределенной влаги называется „усадочной влагой“.

## УСАДОЧНАЯ И ПОРОЗНАЯ ВЛАГА ГЛИН

Глины и каолины	Анализ про		
	Раз		
	> 0,54	0,54—0,2	0,2—0,12
	процент		
1. Глина из Ньески . . . . .	—	0,04	0,1
2. Фаянсовая глина № 229 . . . . .	0,15	0,5	0,4
3. Каолин Цетлицкий . . . . .	—	—	—
4. Глина из Клингенберга . . . . .	—	—	0,02
5. Глина из Галле (тонкая) . . . . .	—	0,02	0,02
6. Шамотная глина СН из Вальдштейна . . . . .	0,5	3,0	1,0
7. Каолин из Шнайтенбаха . . . . .	—	0,02	0,01
8. Глина из Галле (грубая) . . . . .	—	0,12	0,5



Различают еще так называемую „гигроскопическую влажность“, т. е. воду, которую совершенно высушенная глина или масса впитывает из атмосферы.

Этот термин соответствует принятой в технике характеристике „воздушно-сухой материал“. Равновесная гигроскопическая влажность фарфоровой массы при температуре 20—25° С и относительной влажности атмосферы 75%, колеблется в пределах 1,5—2%.

Определение содержания порозной и усадочной влаги, а также величины усадки в глинистых материалах и массах имеет большое значение при установлении режима сушки, поэтому оно заслуживает особого внимания керамиков и теплотехников.

Проф. Рике и инж. Гатом<sup>1</sup> проведено определение количества усадочной и порозной влаги для серии глин и каолинов.

Содержание порозной влаги зависит от природных свойств глин и каолинов и, главным образом, повидимому, от величины их частиц.

В таблице 1 приводятся данные исследований Рике и Гата и вытекающие из них выводы.

Сопоставляя данные механического анализа исследованных глин и каолинов с процентным содержанием в них порозной влаги при небольшом количестве усадочной влаги, напрашивается вывод о повышении содержания порозной влаги при увеличении в глинах и каолинах количества мелких частиц.

Количество порозной влаги может изменяться в зависимости от общего ее содержания в глинах, каолинах и керамических массах; однако, эти колебания менее значительны, чем изменения, обусловленные величиной и формой частиц.

Для вышеотмеченных глин и каолинов отступления процента порозной влаги от средних значений не выходят из пределов 0,25—2,50%.

<sup>1</sup> Riecke und Gat. Ber. d. Deutsch. Keram. Ges., 12, 1931.

Таблица 1

И КАОЛИНОВ (по Рике и Гату)

с е и в а н и е м			Анализ осаждения (сидиментацией)	Порозная влага	Общая влажность глины при определении порозной влаги
м е р ы ч а с т и ц ( в м м )					
0,12—0,088	0,088—0,06	сумма > 0,06	< 0,004		
н о е с о д е р ж а н и е ч а с т и ц				в % к сухому веществу	
следы	0,04	0,18	93,60	23,0	42,0
0,1	0,6	0,75	90,06	18,5	31,0
—	0,03	0,03	84,49	23,05	30,0
0,03	0,5	0,55	78,11	14,85	24,01
следы	следы	0,04	73,41	17,5	28,0
0,4	1,4	6,3	55,90	18,5	29,0
0,01	0,06	0,1	49,94	29,2	34,4
0,2	2,8	3,62	47,98	13,05	18,25

Глины и каолины	Зависимость усадочной воды (S) от общего содержания влаги в массе (W)
1. Клингенбергская глина . . . . .	S = 0,0996 W — 15,04
2. Глина из Ньески . . . . .	S = 0,838 W — 15,82
3. Фаянсовая глина № 229 . . . . .	S = 0,78 W — 11,7
4. Глина из Галле (тонкая) . . . . .	S = 0,773 W — 10,8
5. Глина СН из Вальдштейна . . . . .	S = 0,75 W — 11,25
6. Цетлицкий каолин . . . . .	S = 0,732 W — 15
7. Каолин из Шнайтенбаха . . . . .	S = 0,72 W — 19,51
8. Глина из Галле (грубая) . . . . .	S = 0,963 W — 12,56

Переменное содержание порозной влаги не позволяет установить простую зависимость между общим содержанием влаги и усадочной влагой, линейной и объемной усушкой (сокращением размеров) и найти общие для всех сырых материалов параметры в уравнении  $y = ax - b$ , определяющем эту зависимость.

На основании экспериментальных данных для исследованных глин Рике и Гатом определены данные для установления параметров уравнений

$$S = aW - b \text{ и } L = aW - b,$$

где: S — количество усадочной воды,  
W — общее содержание воды в глине,  
L — линейная усушка.

Эти данные приведены в таблице 2, в которой дан и минералогический состав глин и каолинов.

Как видно из приведенных уравнений, изменение усадки (усушки) есть линейная функция от общего начального содержания воды в массе.

С увеличением общей влажности, содержание порозной влаги увеличивается незначительно; при этом наблюдается соответствующее увеличение пористости массы.

Содержание усадочной воды в глинах, каолинах и керамических массах определяет продолжительность сушки в наиболее опасном периоде, когда изделие сокращается в размерах и может покоробиться и получить трещины, внутренние напряжения и другие дефекты.

### 3. Движение влаги по капиллярам, испарение с поверхности

Основной причиной порчи изделий при сушке является неравномерное удаление усадочной влаги из разных мест высушиваемого изделия. Некоторые участки массы более быстро сушатся и, следовательно, получают большую усадку размеров, а другие отстают и препятствуют такому сокращению размеров.

Если неравномерное обезвоживание происходит тогда, когда изделие еще достаточно пластично, получается искривление поверхностей и нарушение формы, остающиеся и после обжига.

Неравномерная усушка изделий в конечной стадии, когда изде-

## ГЛИН И КАОЛИНОВ ОТ ВЛАЖНОСТИ

Зависимость усушки (линейной) от процента влаги в массе ( $W$ )	Характеристика глин		
	глинистая субстанция	кварц	полевой шпат
	в процентах		
$L = 0,416 W - 6,28$	97,8	2,1	0,1
$L = 0,272 W - 5,14$	96,1	3,7	0,2
$L = 0,262 W - 3,93$	67,9	26,3	5,8
$L = 0,279 W - 3,90$	75,7	23,0	1,3
$L = 0,213 W - 3,19$	89,2	7,2	3,6
$L = 0,213 W - 7,36$	98,7	0,7	0,6
$L = 0,273 W - 6,42$	95,8	4,1	0,1
$L = 0,482 W - 5,26$	32,4	67,6	—

лие, хотя бы в некоторых частях (на поверхности и в участках с тонким черепком), стало твердым, вызывает внутренние напряжения, которые приводят к трещинам, если их величина выходит за пределы упругости высушенного материала. Внутренние напряжения остаются незамеченными и могут обнаружиться в виде деформации или растрескивания в процессе обжига, а также при оправке сырых изделий под влиянием незначительных механических нажимов или ударов.

Наиболее вредное влияние имеет неравномерная сушка в производстве изделий с толстым черепком.

Здесь наиболее ярко выявляются все недостатки сушки и дефекты, получаемые при неправильном ее проведении.

Основными причинами неравномерной сушки являются:

1) задержка в нагреве внутренних слоев массы по сравнению с поверхностными;

2) медленное продвижение влаги от внутренних слоев к наружной поверхности по сравнению с поверхностным ее испарением;

3) влияние факторов геометрического порядка (большие колебания толщины черепка на отдельных участках, неравномерное разветвление наружной поверхности, неравномерно обтекаемая воздухом форма изделия при больших скоростях циркуляции и т. п.).

Помимо элементов конструктивного порядка, определяемых, в основном, условиями службы выпускаемого фабриката, все остальные условия, обеспечивающие быструю и безопасную для формы и целостности изделий сушку, должны быть урегулированы в процессе лабораторного исследования и производственного осуществления процесса сушки.

Вопрос сводится к изысканию оптимальных условий для наиболее быстрого нагрева изделий, испарения влаги с поверхности и передачи ее по капиллярам из внутренних слоев, а также увязке скоростей протекания этих процессов во все периоды сушки.

Испарение влаги из образцов глин, масс и заформованных изделий начинается после прогрева изделий до температуры, при которой упругость паров заключенной в массе влаги будет выше упругости пара в окружающей атмосфере; в противном случае высушивание невозможно.

С повышением температуры изделий увеличивается упругость паров удаляемой влаги и разность давлений, вследствие чего при

стабильном состоянии внешней среды процесс сушки проходит быстрее.

Однако, нагрев изделий сверх температуры кипения воды в порах массы дает давление паров выше атмосферного, ведущее к разрыву — образованию трещин.

Пукалл<sup>1</sup> опытным путем установил наличие отрицательного давления в пористых телах, на поверхности которых происходит испарение (рис. 5).

Пористый сосуд, закрытый пробкой со вставленной в нее длинной трубкой, наполняется водой и опрокидывается с погружением конца трубки в стакан с ртутью.

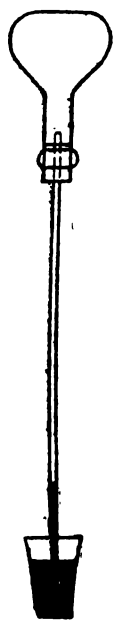


Рис. 5.  
Опыт Пукалла

Испарение воды с поверхности вызывает продвижение ее внутри по капиллярам и понижение давления в сосуде, отмечаемое подъемом уровня ртути в трубке.

Есть основание предполагать это явление и при высушивании всех мелкопористых глин, каолинов и керамических масс. Величина вакуума обратно пропорциональна величине пор высушиваемой массы. Пониженное внутреннее давление создает временные условия для кипения воды в капиллярах при температурах ниже 100°С до тех пор, пока образующиеся пары не создадут более высокого давления.

Быстрое выделение воды внутри массы (кипение в течение хотя бы и весьма ничтожного периода времени) уже способно дать трещины в изделиях, поэтому нагрев изделий не должен доходить до пределов, близких к температурам кипения воды в самой их массе, и соблюдение этого условия является одной из основных предпосылок для надежного ведения процесса сушки.

Помимо нагрева изделий и заключенной в них воды, на скорость испарения влияет ряд обстоятельств, весьма усложняющих процесс сушки и его изучение. Испарение влаги, заключенной в порах масс, происходит со значительными отступлениями от законов испарения воды с открытой поверхности.

Лишь в начальный период, когда на поверхность через капилляры поступает количество воды, соответствующее максимальному ее испарению в данных условиях, можно с известным приближением пользоваться закономерностями, установленными для свободного испарения жидкости.

В дальнейшем, по мере удаления усадочной воды и сокращения размеров пор, испарение воды, обволакивающей тонкой пленкой частицы массы, становится все более затруднительным и отступающим от закономерностей, обусловленных внешними факторами (температурой, влажностью окружающей среды и т. п.).

Эта задержка в выделении влаги дает на диаграммах (рис. 6 и 7) сушки пластичной глины и массы (с содержанием 50% отошающих материалов) характерный изгиб кривой, разделяющий процесс на два периода.

В период, отмеченный участками кривой *AB*, удаление влаги идет довольно равномерно, и здесь испарение определяется, приближенно, следующей зависимостью:

$$\frac{dw}{dt} = (e^1 - e) \cdot c,$$

<sup>1</sup> W. P u k a l l. Sprechsaal, 23. 1926.

где:  $\frac{dw}{dt}$  — скорость испарения,

$e^1$  — давление паров влаги внутри высушиваемой массы,  
 $e$  — давление паров влаги в окружающей массу атмосфере,  
 $c$  — константа для данной глины или массы.

Во второй период сушки, характеризуемый отрезком кривой *BC*, уменьшение скорости испарения соответствует падению давления паров оставшейся в массе воды. Падение давления, повидимому, обусловлено большой связью капиллярной (или, как ее называют некоторые исследователи, „пленочной“) воды с частицами массы.

Режим сушки во второй период для ускорения процесса должен, очевидно, существенно измениться в сторону повышения температуры и снижения влажности окружающей атмосферы.

При сохранении постоянной влажности и температуры наружной атмосферы, понижение давления паров влаги внутри глины или массы приводит процесс к состоянию равновесия, когда прекращается испарение влаги из глины или массы при данных внешних условиях.

Изменяя в сушильном шкафу влажность и температуру атмосферы, можно установить соответствующее минимальное значение влажности глины или массы, до которого они могут быть высушены при атмосфере с измененной температурой и влажностью.

В виде примера на рис. 8 показана кривая равновесия *C* для глины, высушиваемой при постоянной температуре 30°С и переменной влажности атмосферы.

По оси абсцисс показанное изменение относительной влажности в процентах.

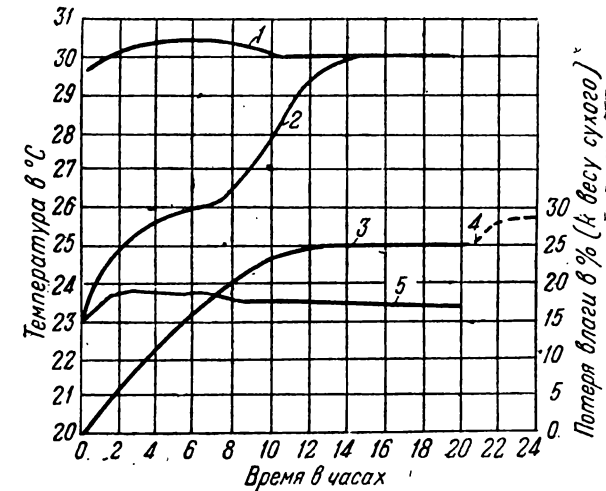


Рис. 7. Диаграмма сушки керамической массы.

1 — температура воздуха по сухому термометру; 2 — температура массы; 3 — потеря влаги; 4 — (пунктир) — сушка при 110°С; 5 — температура воздуха по влажному термометру.

По оси ординат левая шкала показывает изменение влажности высушиваемого материала в процентах к весу сухого вещества, а правая шкала — давление паров в мм ртутного столба. Обе

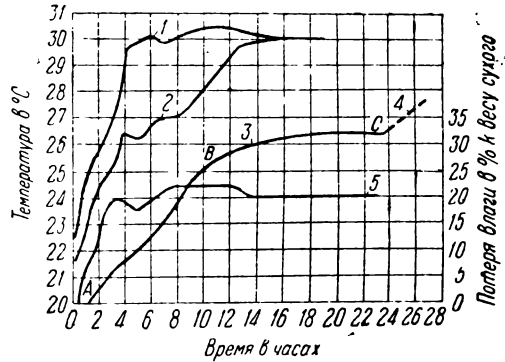


Рис. 6. Диаграмма сушки пластичной глины

1 — температура воздуха по сухому термометру; 2 — температура глины (пластичной, английской); 3 — потеря влаги (пунктир); 4 — сушка при 110°С; 5 — температура воздуха по влажному термометру.

шкалы в приводимом примере имеют чисто случайное совпадение.

Линия *B* показывает изменение давления водяных паров при изменении относительной влажности атмосферы.

Так как явление равновесия, т. е. прекращение дальнейшей сушки образцов, происходит вследствие равенства давления паров влаги в глине или массе и окружающей атмосфере, эта кривая *B* показывает одновременно и давление пара в порах высушиваемого материала.

В сушильном шкафу при свободном испарении влаги до наступления полного высушивания образцов должна поддерживаться насыщенная атмосфера с давлением насыщенного пара, равным при 30° 32 мм и показанным горизонтальной чертой *A*. Особые свойства воды, связанной с частицами глин или керамических масс, повидимому, служат причиной прекращения испарения при ненасыщенной для данной температуры атмосфере.

Разница в давлении паров, насыщающих воздух при установившейся температуре (30°), и давление в атмосфере при неполном насыщении и влажности равновесного состояния определяется отрезками координат между линиями *A* и *B* для каждого участка кривой влажности материала — *C* (в состоянии равновесия).

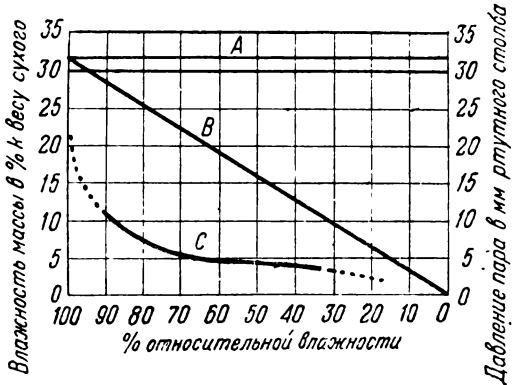


Рис. 8. Кривая равновесия влажности глины и давления пара в атмосфере

*A* — максимальное давление насыщенного пара; *B* — давление пара в массе в зависимости от ее влажности; *C* — равновесное содержание влаги в массе в зависимости от относительной влажности воздуха.

В приведенном примере при температуре 30° С и 5% влажности испытанного образца глины (к сухому веществу) равновесное состояние наступает при относительной влажности атмосферы 60% и давление водяных паров в ней около 5 мм ртутного столба. Пунктиром показано предполагаемое продолжение кривой равновесия *C* за пределами участка, установленного непосредственными наблюдениями.

Направление кривой показывает, что удаление последних процентов влаги требует для обеспечения разности давлений паров, выделяемых высушиваемыми изделиями по сравнению с их давлением в окружающем воздухе, весьма низкой относительной влажности воздуха, т. е. более высокой его температуры и повышенного обмена, что вполне сходится с практическими данными сушки керамических изделий в заводских условиях.

Испарение воды с поверхности изделий зависит от циркуляции воздуха, имеющей в процессе сушки существеннейшее значение.

В начальный период, когда холодные изделия попадают во влажную атмосферу, понижение температуры воздуха у их поверхности при отсутствии циркуляции может дойти до пределов перенасыщения, и влага начнет садиться на изделия в виде росы. Только при наличии усиленной циркуляции воздуха можно получить равномерные температуру и влажность среды в пространстве и во времени, а потому изучение сушки и нормальное проведение этого процесса

на заводах не возможны без использования этого крупнейшего фактора и без учета его влияния.

Диффузия пара в окружающую атмосферу есть функция скорости воздуха, обтекающего поверхность изделия.

Влияние скорости воздуха выражается в увеличении коэффициента диффузии, который при свободной поверхности жидкости растет прямо пропорционально  $\sqrt{v}$ , где  $v$  — скорость газов вдоль поверхности.

Поверхности просушиваемых образцов и готовых изделий имеют неровности, и влага, заключенная в массе, не имеет открытого зеркала испарения, поэтому в установленные формулы должны вноситься поправочные коэффициенты, определяемые экспериментальным путем отдельно для разных типов изделий и керамических масс.

Увеличение скорости воздуха за известными пределами уже не дает увеличения скорости диффузии и потому бесполезно.

Пределом скорости воздуха, за которым увеличение ее уже не отражается на коэффициенте диффузии паров с поверхности в атмосферу, для керамических изделий считается около 3 м в секунду. Как видно из диаграммы (рис. 9), кривая диффузии пара в атмосферу имеет затухающий вид.

Практически большие скорости часто не достигаются, так как испарение влаги с поверхности в количествах, превышающих ее поступлению изнутри, может дать неравномерную сушку массы.

Перемещение влаги в процессе сушки изнутри тела к поверхности иногда обозначается термином „диффузия“, что не соответствует точному его значению. Это явление не похоже на диффузию водяного пара с поверхности и объясняется общеизвестным свойством жидкостей, смачивающих данный материал, — подниматься в его порах на значительную высоту.

Скорость перемещения влаги к поверхности зависит от пористости материалов; однако, прямой зависимости скорости сушки (при прочих равных условиях) от объема пор не наблюдается.

В таблице 3 показано сопоставление выделения влаги в час для глин и масс с их пористостью.

Не меньшее значение, чем объем пор, имеют их размеры, структура и степень сцепления воды с частицами материала.

По Уошбёрну,<sup>1</sup> поры подразделяются на:

- 1) закрытые со всех сторон;
- 2) канальные (сообщающиеся);
- 3) слепые (тупиковые);
- 4) петлеобразные (извилистые);
- 5) карманообразные;
- 6) микропоры (молекулярной величины, не наполняющиеся водой).

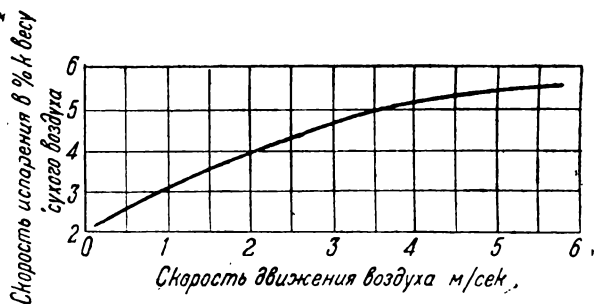


Рис. 9. Зависимость испарения влаги керамического изделия от скорости движения воздуха

<sup>1</sup> Техническая энциклопедия, т. 17, стр. 351.

## ПОРИСТОСТЬ И ВЛАГООТДАЧА КАОЛИНОВ, ГЛИН И МАСС

Сорта глин и керамических масс (образцы с размерами 1" × 6" × 7")	Температура воздуха в °С по сух. терм.	Относитель- ная влаж- ность в %	Скорость выделения влаги в час в %	Средняя пористость в % к сухо- му объему
Каолин из Северной Каролины .	30	85	0,8	41,5
Английская пластичная глина .	29	85	0,3	38,5
То же	30	85	0,28	39,5
Масса для белого товара (полу- фарфора) . . . . .	31	66	0,8	32,7
То же	32	86	0,5	30,5

Определение проницаемости пористых материалов производится:

а) по скорости прохождения стандартной жидкости или газа через единицу площади и глубины материала при определенной температуре и давлении;

б) по скорости проникновения жидкости в материал под действием равномерных сил при отсутствии химического воздействия.

Второй метод определения проницаемости может иметь большее применение при изучении вопросов сушки, так как имеет экспериментальные условия, более близкие к производственным.

Еще ближе к производственным условиям стоят опыты, проведенные в Гос. керамическом институте Ф. А. Зеньковичем, В. П. Зубчаниновым и Д. И. Смирновым, а также опыты Рике и Гата по сушке цилиндров глин и масс с контролем влажности в их отдельных отрезках.

Для определения влагопередачи разных глинистых материалов приготавливались цилиндры влажной глины или массы в раскрытых с одной стороны металлических трубках. Для испарения влаги оставлялось открытым одно основание цилиндра. После просушки цилиндр вынимался из трубки и разрезался на части.

В каждом отрезке цилиндра определялось содержание оставшейся влаги.

Отрезки, расположенные ближе к открытому основанию цилиндра, с поверхности которого испарялась влага, имеют наименьшую влажность, а удаленные — более высокую влажность, вследствие задержки влагопередачи из глубинных слоев глины.

Испытание некоторых глин и каолинов на влагопередачу путем их нагревания в сушильном шкафу и металлических гильзах в течение трех часов при 100—120°С (с последующим охлаждением на воздухе в течение 15 минут) дало результаты, сведенные в таблицу 4.

Приведенные в этой таблице данные позволяют сделать вывод о разной скорости влагопередачи при сушке глин, часто применяемых в нашей заводской практике. Чем больше разница влажности в смежных слоях, тем больше и разница в линейной и объемной усадке и тем больше, следовательно, склонность глин и приготовленных из них керамических масс к деформациям и трещинам.

В опытах, произведенных Рике и Гатом, цилиндры из глин, длиной в 14 см и диаметром 2 см, были помещены в герметические медные футляры и, таким образом, у всех цилиндров оставалось открытым для сушки только верхнее основание.



## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЛАГОПЕРЕДАЧИ ПРИ СУШКЕ ГЛИН

№ по пор.	Наименование глин и каолинов	Влажность слоев, толщиной 10 мм; нумерация, начиная с открытого торца цилиндра						Разница во влажности между 1-м и 2-м слоями
		1	2	3	6	8	9	
1	Янценский каолин (Положский) . . .	20,0	20,5	20,8	21,8	22,3	22,5	0,5
2	Латинская глина (средний карьер).	17,6	18,9	21,5	22,3	24,3	24,0	1,3
3	Байковская глина (Урал) . . . . .	18,5	20,6	22,1	29,8	31,0	31,2	2,1
4	Часов-ярская глина (экстра) . . . . .	17,7	20,3	21,9	23,6	23,9	24,1	2,6
5	Глуховка (скалка) . . . . .	10,6	16,4	20,1	23,0	26,1	28,1	5,8
6	Губинская (мыловка Дулево) . . . . .	10,7	17,8	21,8	23,3	23,7	24,2	7,1

Перемещение влаги к высушиваемой поверхности устанавливалось путем определения влаги в разных местах цилиндра после сушки при температуре 50°С, относительной влажности воздуха 11,9% и скорости воздушного потока 0,18 м в секунду.

Все цилиндры разрезались на 7 равных частей, от которых для определения в них влаги отрезались кружки, толщиной 5 мм.

Результаты испытаний (рис. 10 и 11), приведенные в виде кривых влажности, показывают резкое различие скорости перемещения влаги в глинах и каолинах под влиянием капиллярных сил, возникающих при испарении воды с поверхности.

Левая часть диаграмм дает для отдельных материалов семейство кривых, показывающее содержание влаги во всех участках цилиндра после 1, 2, 3... часов сушки.

В правой части диаграммы кривые показывают с большей наглядностью понижение влажности в каждом отрезке цилиндра (т. е. на разном расстоянии от поверхности испарения) в течение всего периода опытной сушки (6 часов).

Диаграммы показывают, что из четырех исследованных материалов, каолины дали наибольшую скорость прохождения влаги к поверхности. Из нижних частей цилиндра (участки *f* и *g*) по исте-

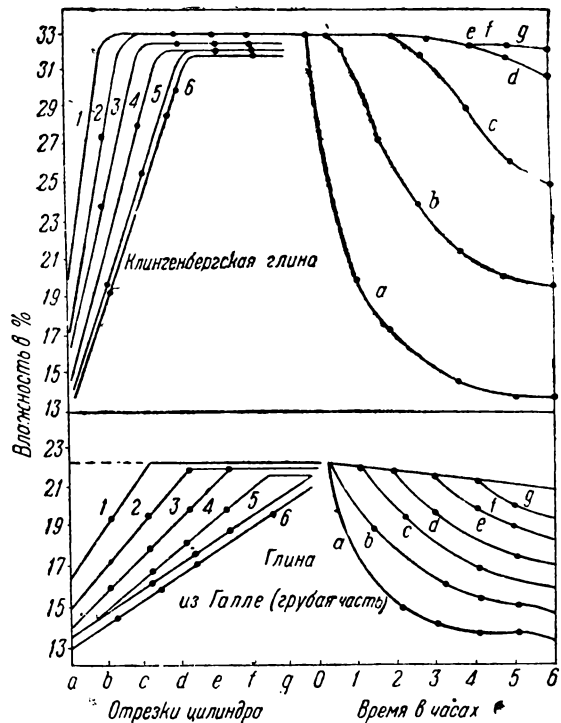


Рис. 10. Перемещение влаги в глинах при сушке

## ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ВЛАГИ ВНУТРИ МАССЫ ПРИ СУШКЕ

Наименование глин и каолянов	Разница влажности верхнего и нижнего участков (см. <i>a</i> и <i>g</i> — рис. 10 и 11) цилиндра после 6 часов сушки
Глина из Клингенберга . . . . .	17,8
Фаянсовая глина № 229 . . . . .	14,5
Глина из Галле (тонкая) . . . . .	11,7
Глина из Ньески . . . . .	11,5
Глина СН из Вальдштейна . . . . .	9,8
Глина из Галле (грубая) . . . . .	8,2
Каолян цетлицкий . . . . .	3,8
Каолин из Шнайтенбаха . . . . .	0,7

чении 6 часов ушло в направлении к поверхности испарения наименьшее количество влаги.

В этом отношении материалы по степени проницаемости располагаются в порядке, показанном в таблице 5.

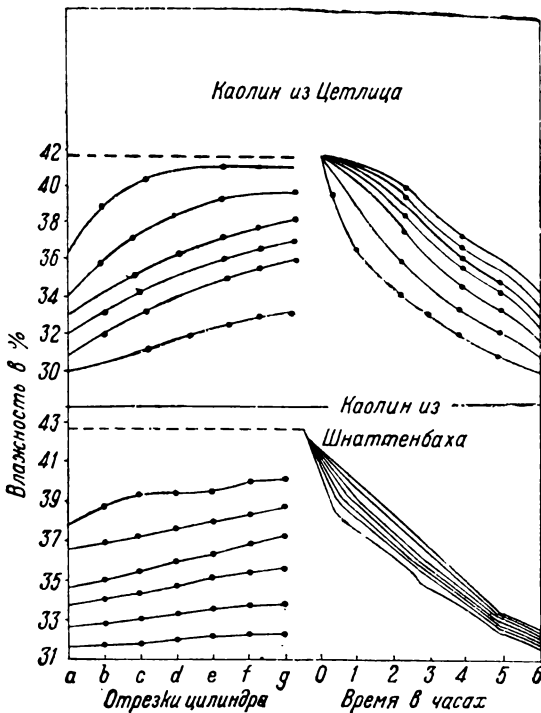


Рис. 11. Перемещение влаги в каолинах при сушке

Направление кривых влажности образца в разных сечениях для отдельных интервалов времени (1, 2, 3... часа) показывают, что малопроницаемые глины не дают в первое время никакого понижения влажности в участках, удаленных от поверхности испарения.

Глина из Клингенберга, по мере удаления от поверхности, дает очень крутой подъем влажности и с четвертого участка начинает терять влагу только после трехчасовой сушки. Влажность последних участков остается практически почти неизменной и после шестичасовой сушки. Подобное явление наблюдается и при высушивании глины из Галле (грубая часть): только в течение 5-го и 6-го часа началась передача влаги из самого нижнего участка цилиндра.

Крутой подъем кривых распределения влаги в массе в период сушки является показателем медленной передачи влаги к поверхности и значительных затруднений в сушке при использовании таких глин.

Совершенно иначе ведут себя в сушке каолины. Как показывают диаграммы, уже в течение первого часа сушки цилиндры на всех участках начали терять влагу, и кривые распределения влаги постепенно приблизились к прямым с небольшим подъемом, что указывает на быстрое установление потока влаги к высушиваемой поверхности и планомерную передачу влаги из глубинных слоев к поверхности.

Кривые падения влажности в отдельных участках (справа) сближаются между собой.

Приведенные данные экспериментального порядка о скорости прохождения влаги к поверхности при сушке образцов сопоставлялись с пластичностью испытуемых материалов; при этом установлена обратная зависимость: по мере увеличения пластичности, как правило, уменьшается скорость передачи влаги в массу образцов и изделий.

Процесс выделения влаги из более влажного участка массы в смежные, более сухие, обуславливается объемом и характером пор и еще мало изученной связью (силами сцепления) между водой и частицами материалов, зависящей от природных свойств последних.

Отставание сушки глубоких слоев массы от поверхностных дает неравномерную усадку (усушку) — первопричину трещин и деформаций. В более массивном изделии при прочих равных условиях получается больший разрыв в потере влаги и усадки на разных его участках и потому в сушильной технике разработаны специальные приемы сушки и назначается более продолжительное время для замедленного испарения влаги с поверхности в соответствии с фактической ее передачей из глубинных слоев массы. Для целого ряда изделий (санитарный фаянс, крупный электрофарфор, огнеупорные брусья и др.) скорость продвижения влаги к поверхности определяет скорость сушки и в основном режим и экономичность процесса.

#### 4. Сушка керамических изделий

Основной и конечной целью всех изысканий в области поведения материалов и масс при сушке является установление оптимального режима сушки изделий в производственных условиях.

В процессе сушки керамических изделий весьма существенную роль играют помимо свойств массы, форма и размеры изделий, — обстоятельства, не принимающиеся во внимание при сушке пробных плиток в лабораторных условиях.

Величина поверхности, непосредственно омываемой воздухом, определяет, как возможную скорость сушки, так и ее равномерность.

Скорость испарения воды (потеря влаги в процентах к весу изделия), при прочих равных условиях, пропорциональна свободной поверхности изделий, приходящейся на 1 кг его веса, т. е. наблюдается равенство:

$$\frac{r_1}{a_1} = \frac{r_2}{a_2} = \frac{r_3}{a_3} \text{ (при остальных равных условиях),}$$

где:  $r_1, r_2, r_3$  — потеря влаги в процентах к весу изделия,

$a_1, a_2, a_3$  — свободная поверхность, омываемая воздухом, на 1 кг веса изделия.

В числе прочих равных условий предполагаются одинаковые температура и влажность и равномерная циркуляция воздуха у поверхности изделий. Поэтому установленная закономерность наблюдается

№ по пор.	Наименование шамотных масс	С о с т а в м а с с					Шамот
		Глина лобытинская коричневая	Глина часов-ярская Р-2	Глина губинская (мыловка)	Глина латная	Каолин глуховецкий	
1	Масса зав. Пролетарий (Новгородского р.)	20	10	10	—	10	50
2	Масса зав. им. Ломоносова	10	10	—	13	15	52
3	Масса зав. Лензос	—	—	—	35	—	65
4	Горшечная масса зав. Лензос	—	№ 5—40	—	—	—	60

только при сопоставлении тел сходной формы, в остальных случаях должны вводиться поправочные коэффициенты.

Продолжительность сушки массивных изделий, обычно, обуславливается скоростью влагопередачи из внутренних слоев к поверх-

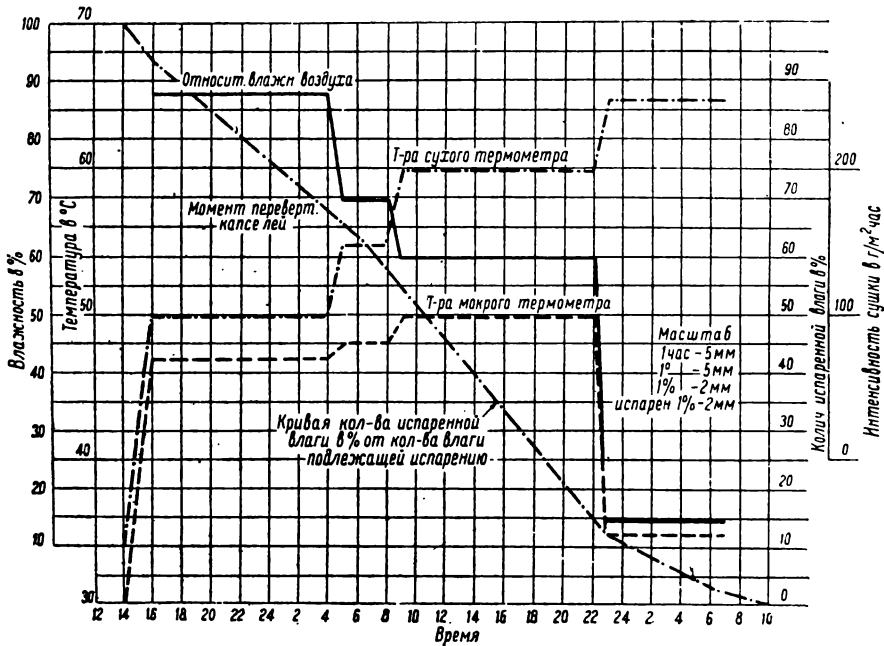


Рис. 12. Режим сушки капсулей при вертикальной циркуляции воздуха (опыт № 6)

ности изделия и допустимой разностью во влажности отдельных его частей, не приводящей к дефектам продукции (деформациям и трещинам).

Большой интерес представляет сушка шамотных масс, из которых изготавливаются массивные изделия.

Исследование процесса сушки пяти шамотных масс, произведенное в сушильной лаборатории ВНИИК под руководством инж.

## И ПОВЕДЕНИЕ ИХ В СУШКЕ

Вода затворения	Линейная усадка	Объемная усадка	Усадочная влага	Порозная влага	Средний процент влажности массы при образовании трещин	Перепад влагосодержания в слоях, близлежащих к трещине
25,75	6,45	19,60	15,0	10,75	24,5	1,0
25	6,4	18,2	10,0	15,0	24,6	0,9
23,6	4,9	15,0	13,0	10,6	19,5	0,85
25	6,27	18,0	17,9	7,1	20	1,8

В. Н. Зимина, дает характеристику влагопередачи и критических перепадов влажности, получаемых в толще массы при ее высушива-

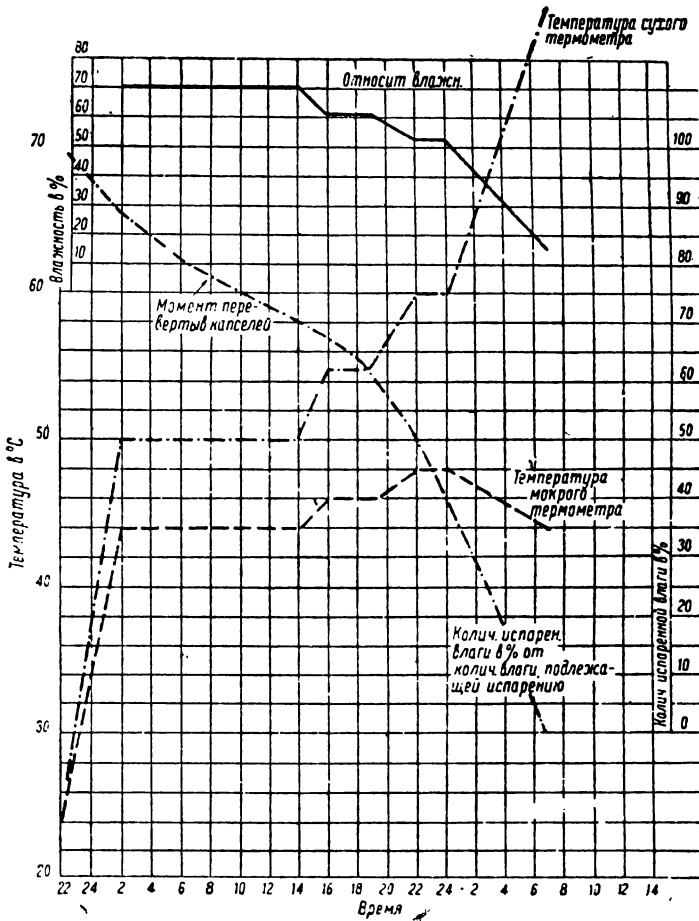


Рис. 13. Режим сушки капсул при вертикальной циркуляции воздуха (опыт № 9)

## ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЛАГООТДАЧИ ПРИ

№ опыта	Наименование шамотной массы	Продолжительность сушки в часах		Начальная влажность массы в %
		до перевертывания	общая	
6	Масса зав. „Пролетарий“ Новгородского р.	10	41	26,3
9	Масса зав. Лензос . . . . .	10	33	22,4
3	Масса зав. им. Ломоносова . . . . .	6	27	24,6
4	„ „ „ „ . . . . .	6	25	31,5

нии. Состав и характеристика шамотных масс приведены в таблице 6.

При сушке массивных (толстостенных) изделий (например, огнеупорного кирпича, капсулей) скорость влагопередачи из внутренних слоев к поверхности и критический перепад влажности между смежными слоями, при котором уже начинаются деформации и трещины, имеют решающее значение и лимитируют количество влаги, снимаемой с поверхности изделия.

Как показали опыты по сушке шамотных капсулей (бандур) в камерной сушилке с переворачиванием и с искусственной вертикальной циркуляцией воздуха, оптимальная интенсивность съема влаги с поверхности в данных условиях колеблется в пределах 123—130 г на 1 м<sup>2</sup> в час (см. стилизованные режимы сушки по опытам № 6 и 9 на рис. 12 и 13).

Сушка в камерной сушилке с горизонтальной циркуляцией дала лучшие результаты, так как горизонтальным потоком инжектируется воздух, находящийся в полости капсуля, и, таким образом, ускоряется просушка дна и соответственно снижается перепад влажности между дном и стенками, обычно, лимитирующий скорость сушки при вертикальной циркуляции воздуха.

При горизонтальной циркуляции оптимальный съем влаги с поверхности (см. стилизованные режимы сушки № 7 и 8 на рис. 14 и 15) достигает 180—220 г на 1 м<sup>2</sup> в час.

Указанные опыты по сушке шамотных капсулей (диаметр около 400 мм) производились при циркуляции воздуха 0,8—0,9 м/сек, в начальный период сушки (до перевертывания капсулей).

В последующие периоды сушки скорость циркуляции воздуха может повышаться до 2 м/сек. Остальные условия сушки для указанных выше режимов сведены в таблицу 7.

Режимы сушки показаны на четырех типичных диаграммах (см. рис. 12, 13, 14 и 15), полученных в результате обработки записей действительных режимов опытных сушек капсулей в шкафу.

Основным отличием режимов при сушке с вертикальной циркуляцией является более высокая влажность атмосферы в начальный период сушки, обусловленная неодинаковой влагоотдачей дна и боковых стенок капсуля и отражающаяся на увеличении продолжительности сушки.

## СУШКА КАПСЕЛЕЙ ИЗ ШАМОТНЫХ МАСС

Количество испаренной влаги		Поверхности отдачи влаги в м <sup>2</sup>	Интенсивность съема влаги в г/м <sup>2</sup> в час; среднее за весь период сушки	Примечание
до перевертывания	общая			
675	2 885	0,57	123	Сушилка с вертикальной циркуляцией То же Сушилка с горизонтальной циркуляцией и переменной направлением воздуха через каждые 30 минут
500	2 450	0,57	130	
360	2 820	0,57	183	
780	3 140	0,57	220	

Экономическая характеристика режимов сушки, подобранных в результате опытных исследований, определяется продолжитель-

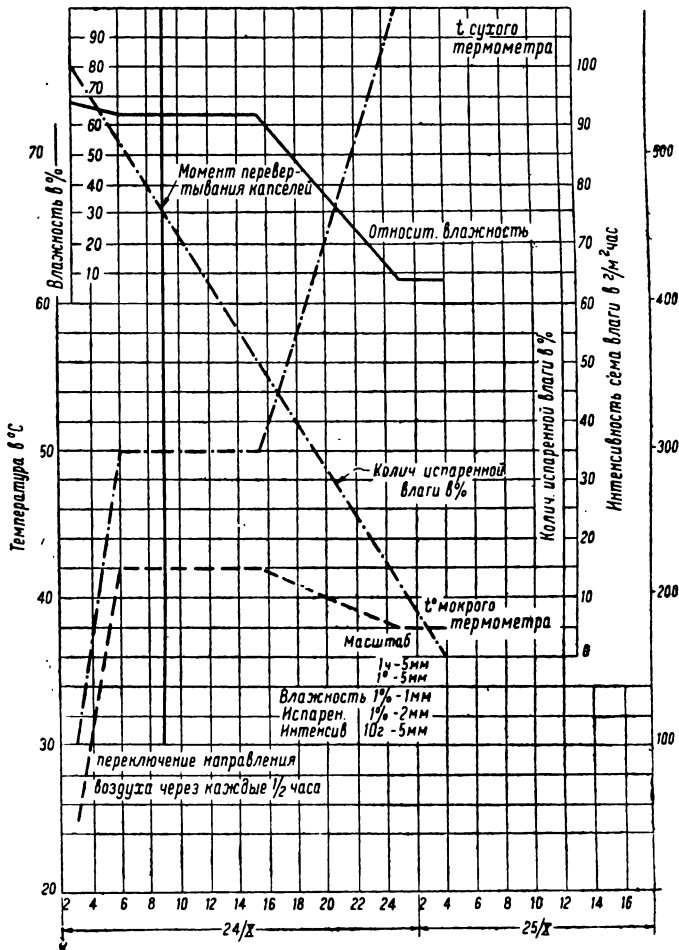


Рис. 14. Режим сушки капсул при горизонтальной циркуляции воздуха (опыт № 7)

ностью сушки и расходом тепла и воздуха, а следовательно, и механической энергии, на 1 кг испаренной влаги.

В сушилке с вертикальной циркуляцией, при установленных режимах и продолжительности сушки порядка 39 часов, расчетный расход воздуха колеблется около 26 кг на 1 кг испаренной влаги, а тепла — 950 кал на 1 кг влаги.

При горизонтальной циркуляции с переменной направленности воздуха получают более благоприятные показатели: продолжительность сушки около 25—

26 часов, расход воздуха 29 кг, а тепла — 940 кал на 1 кг испаренной влаги.

Сушка тонкостенных керамических изделий, например фарфоровой и фаянсовой посуды, резко отличается (по характеру и оптимальным режимам) от сушки массивных изделий. В тонком черепке путь прохождения влаги от глубинных слоев к поверхности весьма короток и потому передача влаги и выравнивание влажностей смежных участков массы происходит быстро даже при интенсивном испарении с поверхности. Перепады влажности незначительны, и сушка рассчитывается на максимально возможную интенсивность влагосъема с поверхности изделия. Особую роль в сушке тонкостенных изделий играют гипсовые формы, с помощью которых оформляются изделия. Гипсовая форма, благодаря пористой структуре, интенсивно отбирает влагу от изделия и, про-

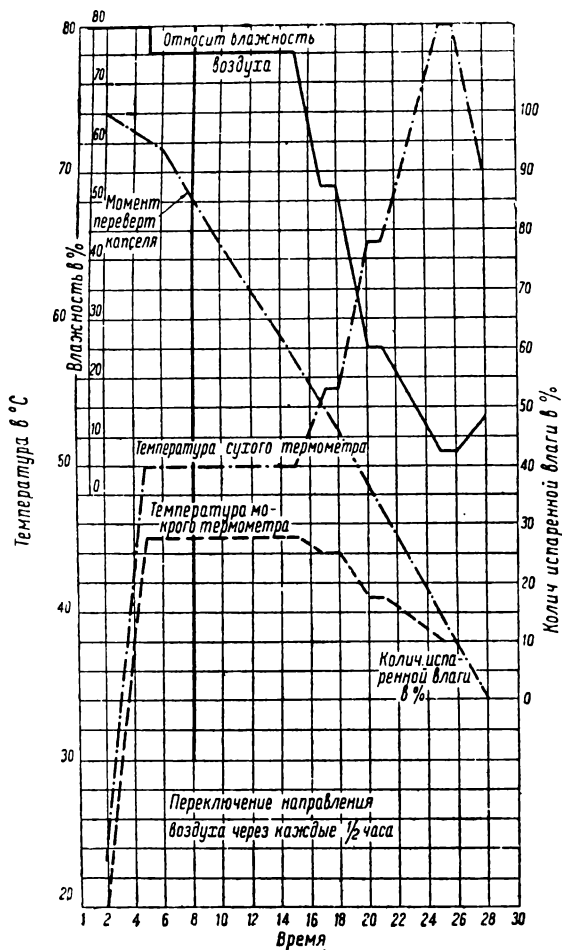


Рис. 15. Режим сушки капсул при горизонтальной циркуляции воздуха (опыт № 8)

сушиваясь вместе с ним в сушилке, обеспечивает двустороннюю и более равномерную влагопередачу со стороны керамической массы.

Благодаря отмеченным обстоятельствам, сушка тонкостенных изделий на гипсовых формах может производиться очень быстро, в течение нескольких часов.

Скорость сушки для тонкостенных изделий с толщиной черепка 3—6 мм устанавливаются не выносливостью самих изделий к жестким режимам сушки, а техническими возможностями быстрого испарения влаги в совершенных сушильных устройствах.



Ускорить испарение влаги с поверхности можно путем: повышения температуры воздуха, циркулирующего в сушилке, снижения его влажности за счет усиленного воздухообмена и увеличения скоростей движения воздуха около поверхности изделия (внутренняя рециркуляция). Однако, форсирование сушки, даже при отсутствии тормозящего влияния медленной влагопередачи, лимитируется рядом обстоятельств в довольно узких пределах.

Температура воздуха в сушилке, как показали опытные исследования в сушильной лаборатории ВНИИК, не может подыматься выше 90°С даже при кратковременной сушке в течение 1,5—2 часов, так как в противном случае гипсовые формы успевают быстро нагреваться выше 65°С, что понижает их прочность и обрачиваемость. Оптимальная температура сушки колеблется около 70°С. Попытки досушивать снятые с гипсовых форм тарелки при температурах от 90 до 140°С привели к их растрескиванию как в сушке, так и в утильном обжиге. Повышение скорости сушки за счет низкой влажности и, следовательно, повышенной влагоемкости воздуха, циркулирующего в сушилке, требует много энергии для привода мощных вентиляторов и тепла на подогревание больших объемов обработанного воздуха.

Обычно, в производственных сушилках для тонкостенных изделий, сообщающихся с атмосферой через загрузочные окна, пользуются воздухом, с относительной влажностью порядка 20—35%.

Экспериментальные работы по установлению оптимальных режимов сушки хозяйственной фарфоровой посуды, проведенные под руководством А. И. Августиника, позволяют охарактеризовать условия сушки и полученные оптимальные режимы.

Для опытов были заформованы тарелки и чайники как типичные образцы плоских и полых тонкостенных изделий (из массы зав. „Пролетарий“, Новгородского р.) следующего состава:

Каолин глуховецкий . . . . .	26%
Глина часов-ярская . . . . .	20%
Кварц . . . . .	26%
Полевой шпат . . . . .	18%
Фарфоровый череп (бой) . . . . .	10%

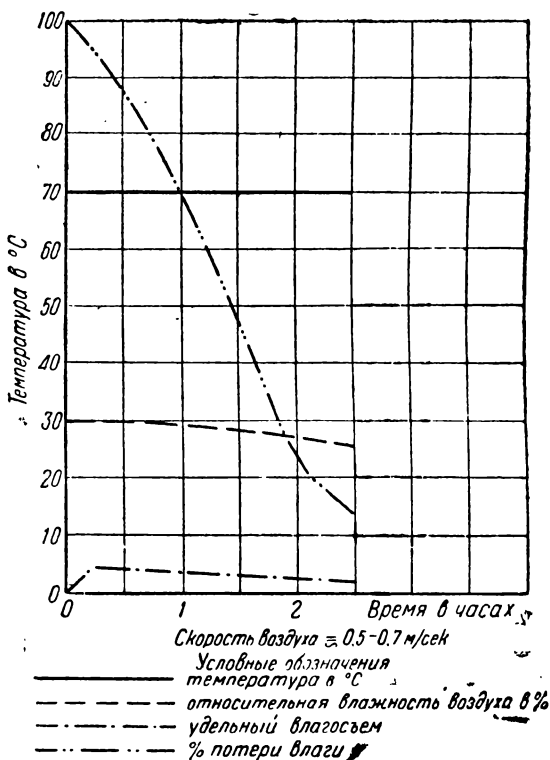


Рис. 16. Режим сушки тарелок

Влажность массы перед формовкой по абсолютно сухому весу — 30,8% (относительная — 23,6%), из коих 14,9% порозной влаги, испарение которой не сопровождается усадкой массы.

Экспериментальным путем в упомянутой работе ВНИИК установлена возможность искусственной сушки тарелок и чайников в течение 1½—2½ часов, в зависимости от толщины черепка, свойств массы и режимов сушки (рис. 16).

Интенсивность влагосъема при сушке тонкостенных изделий на гипсовых формах (чайники с последующим снятием с форм), по ука-

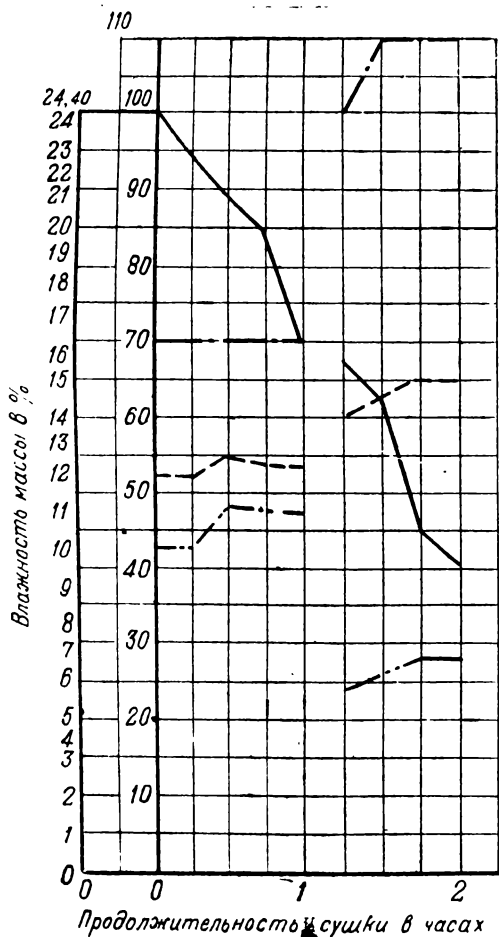


Рис. 17. Режим сушки чайников  
Обозначения см. рис. 18.

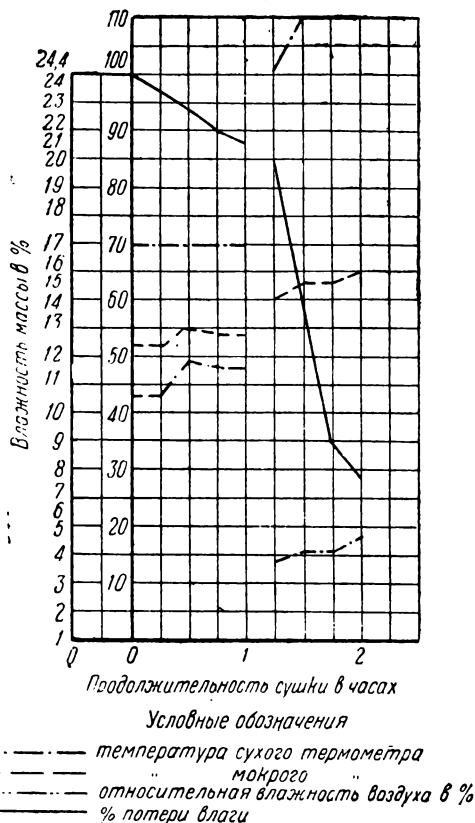


Рис. 18. Режим сушки чайников

занным на рис. 17 и 18 типичным режимам и при скорости циркуляции воздуха 0,5—0,7 м/сек, колеблется в пределах 200—400 г с 1 м<sup>2</sup> поверхности в час.

Значительные колебания в удельном влагосъеме, при сходных режимах сушки тонкостенных изделий, обусловлены, главным образом, профилем изделия и гипсовой формы, а также работой последней в качестве влагопередающего элемента и пористого аккумулятора влагоемкости.

Анализ условий сушки чайников и выбор оптимальных режимов усложняется обязательным разделением сушки на два этапа: сначала в форме, а после приставки носка и ручки — без формы. Как видно из диаграммы сушки чайников, кривые потери влаги, влажности и температуры воздуха разрываются на некоторый не регламентированный период времени, используемый на оправку и приставку чайников в помещениях цеха, не имеющих точно регулируемого теплового режима. Если на практике разнообразные и неудовлетворительные условия сушки тонкостенных изделий, обычно, не дают заметных дефектов, то это можно объяснить лишь крайней выносливостью тонкостенных изделий в процессе сушки. Однако, целый ряд дефектов, например, деформация, отставание носков и ручек и др., получающихся в результате недостаточного изучения режимов сушки, является достаточным стимулом для точного установления цифровых характеристик этого важного процесса.

В изделиях с переменной толщиной черепка (например, в фарфоровых изоляторах с тонкой ребристой частью) более толстые части теряют меньше влаги, так как на единицу веса и влаги в этих местах приходится небольшая площадь испарения. Кроме того, в массивных частях передача воды по поверхности происходит с некоторым промедлением.

Для нормальной сушки изделий с неравномерной толщиной черепка применяется местное закрывание тонких частей или дается менее интенсивное омывание их воздухом; известно, что лобовый удар воздуха дает наибольший испаряющий эффект, а наличие в изделиях впадин, выемок и мертвых углов при их укладке на стеллажах понижают в этих местах обмен воздуха и скорость испарения.

Более глубокое изучение процесса сушки керамических изделий из сырья, используемого заводами СССР, является важнейшей предпосылкой для проектирования и эксплуатации сушилок и потому научно-исследовательские работы в этой области заслуживают со стороны керамиков и теплотехников особого внимания и изучения.

## **II. Изменение в обжиге керамических масс и входящих в их состав компонентов**

(при нагревании свыше 100° С)

### **1. Каолинит и другие водные силикаты**

Каолинит и ряд других водных силикатов алюминия, например, галлоизит, аллофан, пирофиллит, объединяемых общим понятием глинистого вещества, претерпевают в обжиге ряд последовательных, довольно сложных изменений. При сушке можно удалить почти всю воду, механически распределенную в глинистом веществе или в керамической массе. В производственных условиях, в зависимости от продолжительности сушки, температуры и влажности окружающей среды, остающаяся влажность имеет значительные колебания и окончательно удаляется уже в начальном периоде обжига (так называемая „окурка“). Глинистое вещество, в зависимости от его минералогического состава, содержит большее или меньшее количество химически связанной воды, что видно из таблицы 8.

## СОСТАВ ГЛИНООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ

Название	Формула	Состав в весовых процентах		
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
Каолинит . . . . .	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	46,5	39,5	14,0
Аллофан . . . . .	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub> ·5H <sub>2</sub> O	23,8	40,5	35,7
Пиррофиллит . . . . .	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·4SiO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	66,7	28,3	5,0
Галлзит . . . . .	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	43,5	36,9	19,6

Удаление химически связанной воды требует более высокой температуры и сопровождается распадением молекул этих минералов, а также изменением объема (усадка) и внутренней структуры.

Процессы разложения глинистого вещества и дальнейших его изменений неоднократно изучались авторитетными исследователями.

В данное время еще не установлены структурные формулы для каолинита, галлзита и других глинообразующих минералов, однако, из предложенных и вероятных схем<sup>1</sup> пространственного расположения атомов можно сделать вывод, что водород и кислород входят в состав молекулы глинистого вещества и потому частицы воды не могут отщепляться без разрушения молекулы и нарушения химической связи между Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub>.

А. М. Соколов<sup>2</sup> исследовал растворимость глинозема каолинита в 6% HCl в разных стадиях обезвоживания.

Как показывает таблица 9, количество выделенной воды и растворенного в HCl свободного глинозема зависит как от температуры нагрева, так и от продолжительности теплообработки.

Весьма показательное молекулярное соотношение количества растворенного Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и выделяющейся воды, позволяющее сделать вывод об одновременном выделении двух молекул H<sub>2</sub>O.

Как видно из таблицы 9, наиболее интенсивное выделение воды наблюдается в интервале между 400 и 500°C. Ряд исследователей приводит весьма сходные цифровые данные.

Меллором получены кривые потерь конституционной воды и растворимости глинозема каолинита в соляной кислоте, которые подтверждают влияние температур и времени на разложение глинистого вещества (рис. 19).

При нагревании глины с содержанием 10,15% гидратной воды Тамман и Пейп получили следующие потери воды:

за 20 час. нагрева при 350°С — 1,52%  
 „ 295 „ „ „ 400°С — 6%

Остаток воды 1,8% нельзя было удалить даже за 791 час. при 700°С.

Потеря воды в пределах от 110 до 200°С для большинства глин и каолинов не превышает 1%.

По исследованиям К. Г. Куманина часов-ярская глина после нагревания в течение 1900 час. при 700°С еще выделяла 0,07% гидратной воды, что показывает наличие в глине гидросоединений, отличных по природе от каолинита.

<sup>1</sup> Riecke. Sprechsaal, 44 и 45, 1911. — Mellor and Haldcroft. Trans. of the Engl. Cer. Soc., X, 1910—1911.

<sup>2</sup> А. М. Sokoloff. Keramische. Rundschau, 20, 1912.

## ИЗМЕНЕНИЕ КАОЛИНИТА ПРИ НАГРЕВАНИИ

Температура и время прокаливания		Количество удаленной воды (по погере в весе) в %	Количество растворившегося $Al_2O_3$ в %	$Al_2O_3 : H_2O$
°С	часы			
300	1	0,72	2,12	1 : 1,91
400	1	0,67	2,08	1 : 2,03
400	3	0,94	2,61	1 : 2,00
400	5	3,85	—	—
500	1	2,33	—	—
500	3	10,77	28,80	1 : 2,12
500	5	11,20	—	—
600	1	10,14	28,46	1 : 2,14
600	3	11,93	31,85	1 : 2,12
600	5	—	—	—
700	1	11,92	32,30	1 : 2,06
700	3	12,40	—	—
700	5	12,94	33,96	1 : 2,12
800	1	12,99	34,66	1 : 2,12
800	3	12,99	34,61	1 : 2,06
800	5	13,00	34,67	1 : 2,12

Период наиболее интенсивного выделения воды находится в пределах 400—500°С, однако, при быстром нагреве скорость разложения глинистого вещества отстает от подъема температуры и основная масса воды выделяется в интервале 500—600°С.

Некоторые противоречия исследователей в определении температурного интервала дегидратации глинистого вещества, повидимому, объясняются неоднородностью состава испытуемых образцов глин и каолинов.

Наличие в глинах алофаной части, органических веществ и гидратов окисей алюминия и железа приводит к выделению воды и значительным потерям веса при температурах ниже 400°С.

По данным Голдсворт и Кобб,<sup>1</sup> значительная потеря воды с изменением цвета наблюдались: у диаспора при 370—400°С, у красного боксита при 350—410°С, у гибсита при 160—190°С, у серого боксита при 200—220 и 300—450°С.

Обезвоживание глинистого вещества является эндотермическим процессом (поглощающим теплоту). При нагревании глинистого веще-

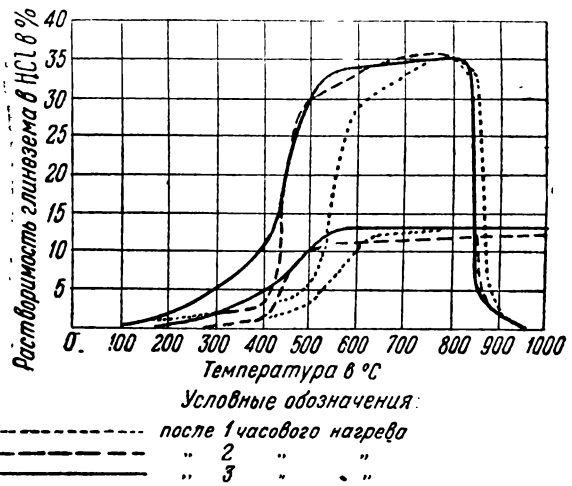


Рис. 19. Кривые растворимости глинозема и потерь воды при обжиге каолинита.

<sup>1</sup> Holdsworth and Cobb. Trans. of the Engl. Cer. Soc., 23, 1923—24.

ства эндотермическая реакция разложения проявляется в замедлении подъема температуры.

Изучение кривых нагревания глин и каолинов показывает область температур, при которых выделение гидратной воды происходит с наибольшей скоростью.

В глинистом веществе глинозем иногда замещается  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , которая при температурах 450—650°C также отделяется от кремнезема в свободном виде. Свободная окись железа дает характерное кремовое и красное окрашивание глин, масс и утильного фарфора при невысоких температурах обжига.

Сопоставление схематических кривых температур нагрева каолина 1 и глин 2 (рис. 20) показывает в последних замедление в нагревании, т. е. эндотермическую реакцию при низких температурах, объясняемую наличием примесей, отдающих воду ниже 400°C, тогда как каолины, приближающиеся по составу к чистому каолиниту, дают в кривой нагревания только один эндотермический изгиб после 500°C; например, кривая нагревания глуховецкого каолина показывает, по испытаниям ВНИИК, отчетливое замедление в подъеме температуры на участке от 540 до 575°C (рис. 21).

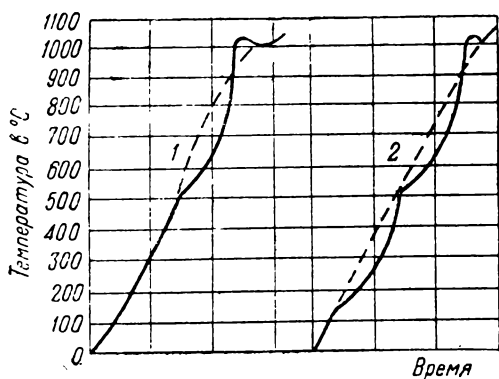


Рис. 20. Кривые нагревания каолина и пластичной глины

Мак-Ги и Симпсон<sup>1</sup> в целях определения расхода тепла на нагрев керамических изделий и уточнения тепловых балансов, произвели ряд исследований глин и каолинов и при этом установили расход тепла на эндотермическую реакцию разложения разных глин и каолинов в пределах 35—150 кал на 1 г сухого вещества.

В отношении структуры обезвоженного глинистого вещества имеется несколько предположений.

Меллор и Скотт<sup>2</sup> полагают, что каолинит при температурах до 500°C уже разлагается на  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

Я. В. Самойлов, наоборот, считает, что каолинит распадается на  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ .

Однако, нерастворимость  $\text{SiO}_2$  обезвоженного каолина в 5% растворе соды показывает,<sup>3</sup> что химическая связь между  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  сохранилась, хотя и в ослабленном виде.

Имеется ряд исследований, на основании которых можно предполагать, что процесс дегидратации приводит к получению каолинового ангидрида (метакаолина)  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , хоть связь между  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  в значительной мере ослаблена.<sup>4</sup> По исследованиям Д. С. Бе-

<sup>1</sup> Мак-Ги и Симпсон. Теплоемкость керамических материалов. М., 1930.

<sup>2</sup> Mellor and Scott. Trans. of the Engl. Cer. Soc., 23, 1923—24.

<sup>3</sup> П. А. Земятченский. К вопросу об изменении каолинита при высоких температурах. Изв. Института физ.-хим. анализа, 11, 1924.

<sup>4</sup> Б. С. Швецов. Введение в химию кремния. Гизлегпром, Л.-М., 1934. — Г. Зальманг. Физические и химические основы керамики. Перевод под редакцией Д. С. Белянкина и Я. В. Ключарова. ОНТИ, Л., 1935.

лянкина и В. П. Ивановой „метакаолин“ является тончайшей дисперсной смесью окислов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и не имеет свойств индивидуального кристаллического вещества.

Глины, почти полностью обезвоженные при температурах 600—700°C, обладают свойством регидратации.

При нагревании обезвоженной глины с водой в течение 8—48 час. при температурах 200—270°C в глинистом веществе восстанавливаются пластичность и коллоидальные свойства.

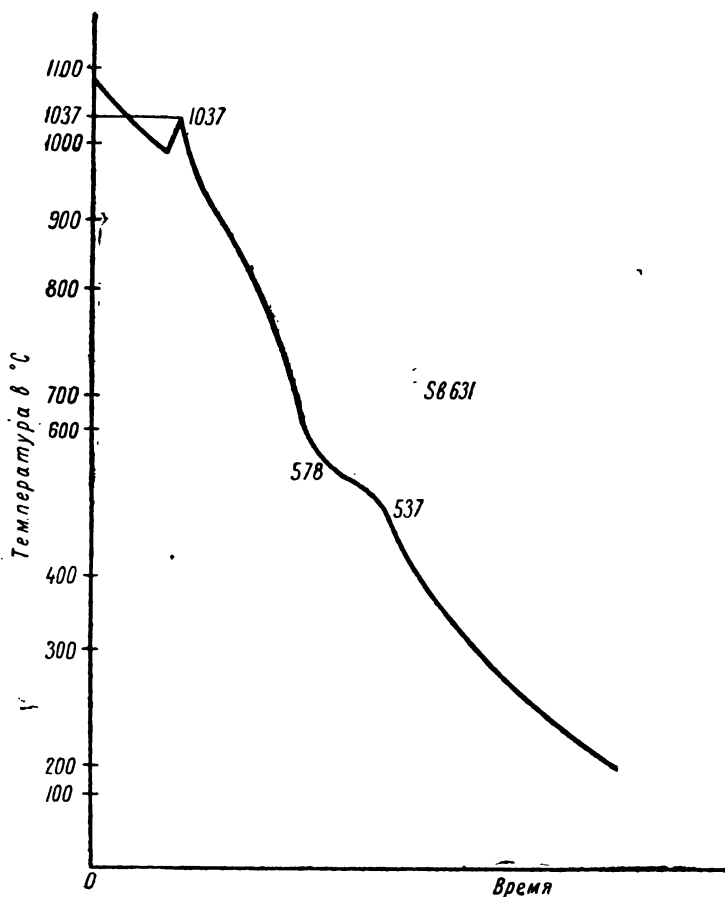
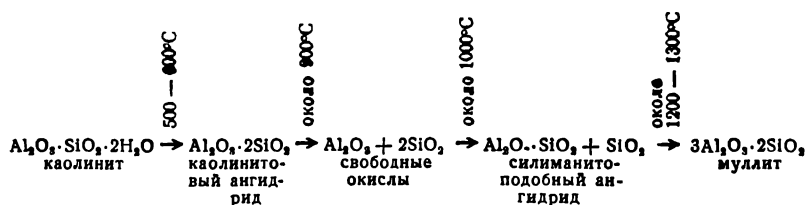


Рис. 21. Кривая нагревания глуховецкого каолина

Отсюда также выводится заключение о наличии в обезвоженных глинах и каолинах соединения  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в виде каолинитового ангидрида  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ .

Уошборн приводит соображения о медленной регидратации всех низкообожженных глин при соприкосновении с водой. Скорость регидратации и восстановления пластичности определяется рядом внешних условий и свойств обезвоженного материала (температура и степень обезвоживания и т. п.).

По схеме В. Вернадского, каолинитовый ангидрид распадается на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  при температуре около 900°C:



В. И. Искюль<sup>1</sup> путем обработки обожженных при 1220—1040°С каолинов в 10% растворе КОН также установил наличие смеси свободных Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub>.

Вместе с тем, в пределах 800—1300°С, по мнению ряда исследователей, уже образуется более прочное соединение из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub>.<sup>2</sup>

Это соединение устойчиво в отношении обработки HCl и KOH.

В отношении физических свойств образование таких соединений в глинах и массах характеризуется постепенным уменьшением объема (усадкой) и водопоглощаемости и увеличением их прочности на излом по мере подъема температуры выше 800°С.

Так, например, глуховецкий (адельгеймовский) каолин при нагревании свыше 900°С имеет, по данным ВНИИК, следующие усадку и водопоглощаемость (см. таблицу 10).

Таблица 10

Температура в °С	900	950	1200	1265	1280	1300
Усадка в % . . . . .	3,0	6,0	7,0	14,5	19,0	19,0
Водопоглощаемость в % .	не определялась		27,45	6,53	1,17	0,35

В вопросе о точной химической характеристике и структуре обезвоженного каолинита при температурах 900—1000°С до сих пор нет единодушного мнения.

Высказываются предположения о модификационных изменениях глинозема, переходящего из γ-глинозема в α-глинозем с выделением тепла,<sup>3</sup> об образовании аморфного соединения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub> по реакции Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiO<sub>2</sub> = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub> + 45,95 ед. тепла, превращающегося затем в кристаллический силлиманит и муллит.<sup>4</sup>

Изучение химической природы глин и каолина при нагреве около 1000°С осложняется началом образования щелочных силикатов, связывающих кремнезем.

Образование в обезвоженном каолините новых химических соединений или перегруппировок при нагреве от 900 до 1000°С подтверждается выделением тепла, обнаруживаемого во всех глинистых материалах при их термическом анализе.

Кривая нагревания в интервале 900—1050°С дает резкое повышение (см. рис. 20), и только в некоторых глинах выделение тепла скрадывается запозданием реакции разложения глинистого вещества, проходящей с поглощением тепла.

<sup>1</sup> В. Искюль. Об отношении каолинита к высоким температурам. Тр. ГИКИ, Л. 1925.

<sup>2</sup> J. Stark. Die physikalische-technische Untersuchung keramischer Kaoline. Leipzig, 1922.—Riecke und Wiese. Ber. d. Deutsch. Keram. Ges., Bd. 9, H. 3, 1928.

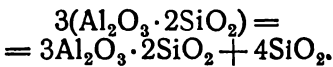
<sup>3</sup> Kerpeler. Sprechsaal, 46, 1913.

<sup>4</sup> Knote. Trans. Amer. Cer. Soc., XII, 1910.



Экзотермический эффект в интервале 900—1000°C для разных глин и каолинов колеблется, по исследованиям Мак-Ги и Симпсона, в пределах 10—40 кал на 1 г сухого вещества. В некоторых случаях опыты показали только 5 кал на 1 г, что, повидимому, следует объяснить запозданием эндотермической реакции, обычно протекающей при температурах около 500°C, или же специфическими свойствами глины.

При дальнейшем нагревании каолинита свыше 1000°C установлено образование соединения  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ , которое при температурах 1200—1400°C переходит в муллит —  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  с выделением  $\text{SiO}_2$  по следующей предполагаемой схеме:<sup>1</sup>



В виду сходства силлиманита и муллита в оптическом и рентгенологическом отношениях, определение их в обожженных изделиях и материалах весьма затруднительно и потому в настоящее время нет точных данных о количественном соотношении этих кристаллических образований.

По Вискову-Боуэну и Грейгу, при высоких температурах (выше 1200—1300°C) в обожженных керамических массах муллит является стабильной и преобладающей кристаллической формой и только при охлаждении может иметь место его разложение на силлиманит —  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Муллит плавится без разложения, при температуре около 1810°C, а силлиманит — при 1816 ± 10°C.

Как видно из силлиманитной диаграммы (рис. 22) двойной системы  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ , в зависимости от содержания в массах  $\text{Al}_2\text{O}_3$

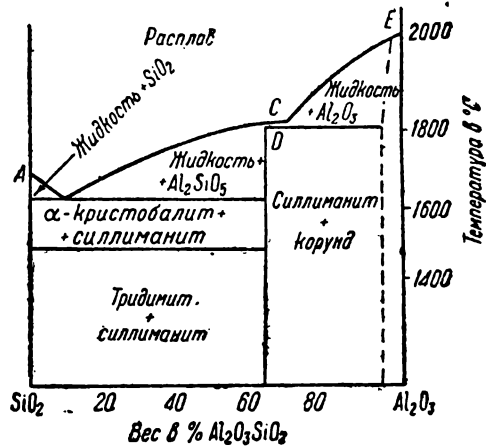


Рис. 22. Силлиманитная диаграмма

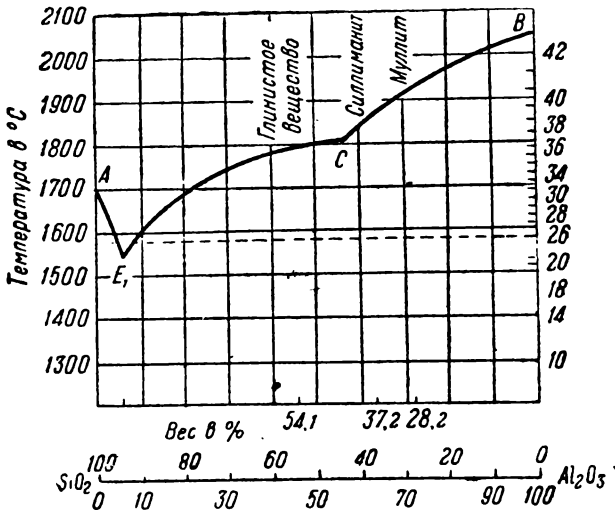


Рис. 23. Муллитная диаграмма

<sup>1</sup> J. Rhode. Keram. Rundsch., 25—29, 1927.

и  $\text{SiO}_2$ , при температурах ниже плавления силлиманита может получаться жидкая фаза.

Смесь из 90%  $\text{SiO}_2$  и 10%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (эвтектика кристобалита и силлиманита) плавится при  $1600^\circ\text{C}$ , поэтому выше этой температуры кремнезем может, в известных пределах, служить плавнем для высокоогнеупорных масс.

В муллитной диаграмме системы  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ , приведенной на рис. 23, по работам Боуэна и Грейга, первичным продуктом кристаллизации является не силлиманит, а муллит —  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , который не образует эвтектики с корундом.

Отдельные точки диаграммы системы  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  отмечены в таблице 11.

Таблица 11

Обозначение точек	Состав в весовых процентах		Характер равновесия	Температура в $^\circ\text{C}$
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$		
<b>Силлиманитная диаграмма</b>				
A	0	100,0	Точка плавления кристобалита	$1710 \pm 10$
B	около 10,0	90,0	Эвтектика $\alpha$ -кристобалита и силлиманита	около 1600
C	62,85	37,15	Точка плавления силлиманита	$1816 \pm 10$
D	около 64,0	36,0	Эвтектика силлиманита и корунда	около 1800
E	100,0	0	Точка плавления корунда	2050
<b>Муллитная диаграмма</b>				
A	0	100,0	Точка плавления кристобалита	$1710 \pm 10$
B	5,5	94,5	Эвтектика $\alpha$ -кристобалита и муллита	1545
C	55,0	45,0	Жидкая фаза: состав C, корунд и плавящийся муллит	1810
D	71,8	28,2	Жидкая фаза: состав C, корунд и плавящийся муллит	1810
E	100,0	0	Точка плавления корунда	2050
Чистый каолинит плавится при температуре около $1770^\circ\text{C}$ .				

## 2. Кремнезем

Кремнезем является основным элементом почти во всех керамических массах.

Кварц вводится в массы в виде отошающей добавки и примесей в глинистых материалах, а также выделяется при разложении последних при высоких температурах.

Кварц (безводный) встречается в природе в виде трех полиморфных модификаций: кварц, тридимит и кристобалит. В условиях обжига, по мере изменения температур, происходят превращения одной модификации в другую.

Важнейшим последствием этих превращений, играющих крупную роль в технологических процессах керамического производства, является изменение удельного веса, объема и некоторых других физических и химических свойств.

Условия образования различных модификаций  $\text{SiO}_2$  изучены рядом исследователей и показаны на диаграмме (рис. 24), построенной по данным работ Феннера.

На диаграмме по оси абсцисс показаны температуры, а по оси ординат — давление пара полиморфных модификаций.

Кривые давления пара разных модификаций имеют на определенных интервалах температур наиболее низкое положение, показанное жирной линией, характеризующей на данном интервале меньшее давление паров этой модификации по сравнению с другими.

Участок кривой, показанной жирной линией, — область устойчивого состояния данной модификации, например, для  $\beta_2$  ( $\gamma$ )-тридимита область стабильного состояния является участок кривой между 870—1470°C, где на диаграмме показано давление паров этой модификации более низкое, чем у  $\beta$ -кварца и  $\beta$ -кристобалита.

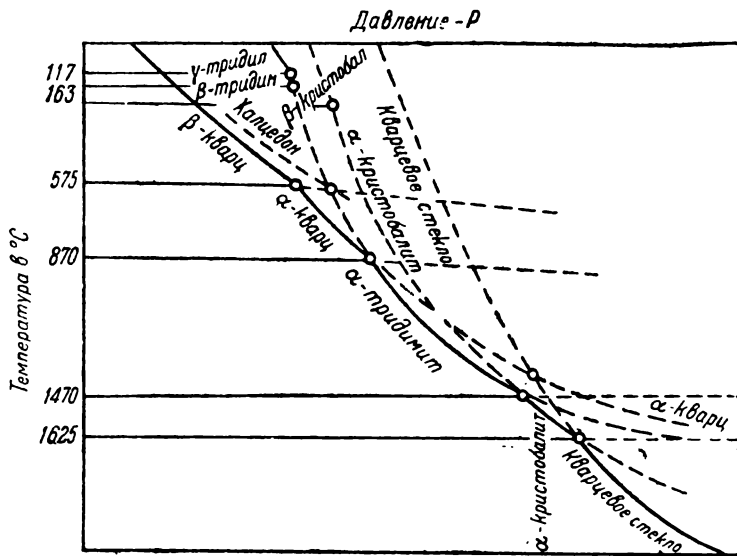


Рис. 24. P-t диаграмма системы SiO<sub>2</sub>

Ниже приводим температурные точки перехода одной модификации в другую:

α-кварц ⇌ β-кварц	при 575° C
α-кварц ⇌ α-тридимит	• 870° C
α-тридимит ⇌ α-кристобалита	• 1470° C
α-кристобалит ⇌ жидкая фаза SiO <sub>2</sub>	около 1710° C
γ-тридимит ⇌ β-тридимит	• 117° C
β-тридимит ⇌ α-тридимит	• 163° C
β-кристобалит → α-кристобалит	от 220 до 275° C
α-кристобалит → β-кристобалит	• 240 • 180° C

В отношении устойчивости тридимита и кристобалита при температурах выше 1470°C имеется ряд мнений, и этот вопрос еще окончательно не выяснен.

По Ле-Шателье, при высоких температурах вполне устойчив только тридимит.

Инслей и Клейн считают, что при обжиге выше 1470°C в керамических изделиях можно обнаружить только кристобалит и нахождение в этих случаях тридимита объясняют лишь замедленным и недостаточным прогревом середины кирпичей при наружной их температуре выше 1470°C.

Все исследователи сходятся в вопросе о влияниях плавней на тридимитизацию кварца и считают, что в пределах устойчивости тридимита наличие плавней способствует его образованию.

По Фергюсону и Мервину, точка плавления тридимита  $1670 \pm 10^\circ\text{C}$ , а кристобалита  $1710 \pm 10^\circ\text{C}$ .

Удельные веса, объемы и кристаллографические характеристики модификации кварца приведены в таблице 12.

Таблица 12

УДЕЛЬНЫЕ ВЕСА И ОБЪЕМЫ МОДИФИКАЦИИ КВАРЦА

Модификация	Кристаллическая система	Удельный вес	Удельный объем
$\alpha$ -кварц	Гексагональный трапецоэдр .	2,52—2,53	0,3968—0,3952
$\beta$ -кварц	Тригональный трапецоэдр . .	2,65	0,3773
$\alpha$ -тридимит	Не установлена . . . . .	2,30	0,4348
$\beta$ -тридимит	Гексагональная . . . . .	2,32	0,4310
$\gamma$ -тридимит	Орторомбическая . . . . .	2,29—2,32	0,4367—0,4310
$\alpha$ -кристобалит	Кубическая . . . . .	2,21	0,4524
$\beta$ -кристобалит	Псевдо-кубическая . . . . .	2,33—2,34	0,4292—0,4274
Кварцевое стекло	Аморфная . . . . .	2,21	0,4524

Переход  $\text{SiO}_2$  из одной модификации в другие с изменением объема имеет большое значение в керамических производствах.

При обжиге кварца перед его размолот превращения кварца являются причиной растрескивания кусков и более легкого измельчения под бегунами и в шаровых мельницах.

Увеличение объема кварца, введенного в состав масс, соответственно уменьшает их усадку в обжиге и потому является благоприятным фактором производства.

### 3. Плавни

#### Окислы щелочных и щелочноземельных металлов

Помимо пластичных материалов — глины и каолинов — и основного отощающего материала — кварца, большое значение в образовании керамического черепка играют разного рода плавни. При температурах обжига плавни образуют вязкое стекло, вступают в химическое соединение с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$ , и дают легкоплавкие силикаты.

Образование в процессе обжига вязкой расплавленной фазы обуславливает прочную связь между отдельными частицами глинистого вещества и отощающих материалов массы и определяет прочность, плотность и другие свойства готовой керамической продукции.

Иногда применяемые для производства глины и пески содержат достаточное количество плавней в виде естественных примесей, например, в производстве строительного кирпича, черепицы, гончарном. В других случаях плавни вводятся дополнительно: производство фарфора, твердого фаянса и др.

Количество и состав плавней в значительной мере определяют температуру обжига и качество получаемой продукции.

Наиболее активными плавнями являются щелочи и щелочноземельные окислы, которые в свободном виде хотя и не содержатся в массах в значительных количествах, но все же имеют существенное значение в начальный период спекания черепка.

Щелочные окислы  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  могут попадать в массы вместе с глинами в виде карбонатов, водных силикатов, сульфатов и других растворимых солей, содержание которых в сумме выражается долями процента и, обычно, не превышает 1%. Карбонаты, сульфаты и другие соединения  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$  и  $\text{Ba}$  встречаются в исходных материалах и в массах в более значительных количествах. Углекислые соли  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  плавятся при температурах 853 и 885°C и весьма активно реагируют с  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Образование соединений с основными окислами может происходить и между твердыми фазами. При высоких температурах молекулы кристаллов обладают некоторой подвижностью и могут диффундировать в твердое тело. Щелочные окислы, карбонаты и силикаты диффундируют при высоких температурах в поверхностный слой зерен кремнекислоты и, путем образования легкоплавких силикатов, способствуют расплавлению зерен кварца или их растворению в жидких стеклах.

Образование силикатов кальция из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$  при температурах ниже точек плавления обоих компонентов объясняется диффузией и образованием в поверхностных слоях зерен легкоплавких силикатов.

Наибольшей способностью диффузии в твердом состоянии обладают силикаты щелочей, затем силикаты щелочных земель и железа.

Взаимодействие между твердыми  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и плавнями протекает весьма медленно и только по мере образования жидкой фазы, обволакивающей отдельные зерна тугоплавких материалов и создающей тесный контакт между реагирующими компонентами, реакции идут со скоростями, имеющими практическое значение при обжиге.

Некоторые силикаты  $\text{Na}$  и  $\text{K}$  плавятся при низкой температуре порядка 70—1100°C и дают начало образованию жидкой фазы, способствующей более быстрому образованию разнообразных и более сложных тройных и других силикатов.

Щелочные соли (карбонаты и силикаты) применяются в больших количествах для получения легкоплавких глазурей и эмалей, где они являются незаменимыми плавнями (фаянсовая и соляная глазурь, фритты, цветные эмали по металлу).

Щелочные соли как плавни при составлении керамических масс не используются, ввиду их растворимости и связанными с этим неудобствами технологического порядка (необходимость фриттования и т. п.), однако, с их наличием необходимо считаться в тех случаях, когда щелочи в качестве электролита вводятся в шликер при отливке фаянсовых и других изделий. Тройные системы  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O}$  и другие более сложные системы с участием  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  еще мало изучены. Известен ряд эвтектик и соединений с весьма низкими температурами плавления; например, соединение  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$  плавится при температуре 1000—1060°C.

Щелочноземельные окислы  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ , часто применяемые как плавни, вводятся в виде карбонатов (известняки, доломиты) и силикатов (слюда и др.).

$\text{CaO}$  образует с  $\text{SiO}_2$  плавящееся при температуре 1436°C соединение  $\alpha$ -тридимита с  $\alpha\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (псевдоволластонитом), а с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  дает эвтектику с содержанием по 50% каждого компонента и точкой плавления  $1395 \pm 15^\circ\text{C}$ .

Относительно высокие температуры плавления соединений  $\text{CaO}$  с  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в двойных системах не характеризуют  $\text{CaO}$  как

плавень, так как в тройной системе  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaO}$  получается ряд соединений с весьма низкой температурой плавления, области возникновения которых с изотермами плавления показаны на тройной диаграмме (рис. 25).

Из ряда легкоплавких эвтектик выделяется эвтектика  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  и  $\alpha \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (23,25%  $\text{CaO}$ , 14,75%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 62%  $\text{SiO}_2$ ) с температурой плавления  $1170 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Образование легкоплавких силикатов и еще более легкоплавких сложных эвтектик показывает, что свободная окись кальция является сильным плавнем.  $\text{CaCO}_3$  разлагается при температуре около  $900^\circ\text{C}$  и в период спекания массы уже реагирует как окись кальция.

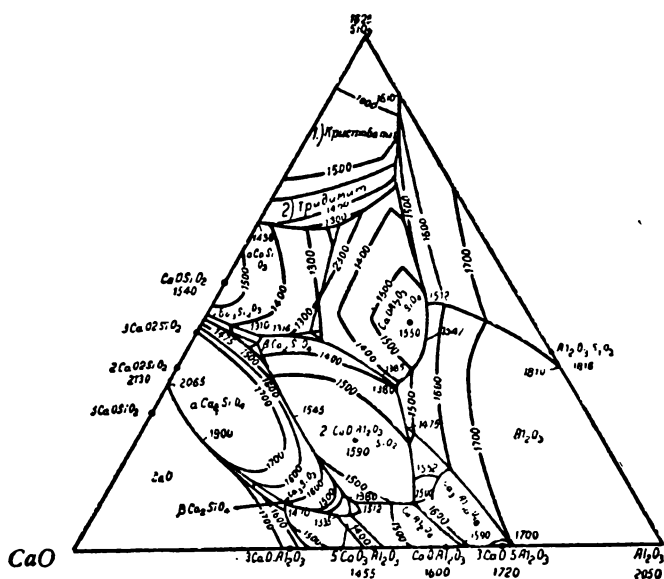
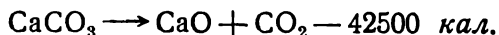


Рис. 25. Система  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

Разложение  $\text{CaCO}_3$  протекает с поглощением тепла по формуле



Скорость реакции увеличивается с повышением температуры и понижением концентрации и давления углекислоты в окружающей атмосфере.

Применение  $\text{CaO}$  в виде плавня дает очень небольшой интервал температуры между началом спекания и плавления массы (около  $50-60^\circ$ ), что приводит к деформации изделий в процессе обжига, где, обычно, конечная температура обжига в разных точках печной камеры не может удерживаться в тесных пределах.

Это обстоятельство ограничивает применение известняка и мела в виде плавней в больших количествах; часто вместе в ними вводятся другие плавни, дающие более длинный интервал между спеканием и сплавлением черепка.  $\text{MgO}$  дает с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  ряд силикатов: форстерит  $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ , клиноэнстатит  $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ , кордиерит  $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$  и др.

Система  $\text{MgO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$  дает ряд эвтектик, имеющих следующий состав (в процентах):

Таблица 13  
СОСТАВ ЭВТЕКТИК MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>

	Состав эвтектик		
	1E	5E	6E
MgO . . . . .	20,3	25,0	56,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	18,3	21,0	16,0
SiO <sub>2</sub> . . . . .	61,4	54,0	28,0
Температура в °C ± 5° . .	1345	1360	1700

Температура плавления эвтектик MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub> выше, чем в системе CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>, и потому MgO без участия других щелочных и щелочноземельных окислов является мало активным плавнем.

Однако, в смеси с CaO, что очень часто встречается в сырых материалах, MgO дает ряд легкоплавких составов, например, 29,8% CaO, 20,2% MgO, 50% SiO<sub>2</sub>, плавящийся при 1157°C.

Примесь MgO, по работам Мекклер и Хаттингер,<sup>1</sup> способствует медленному размягчению глин (и масс) вместо быстрого размягчения (жидкоплавкости), наблюдаемого при пользовании известью в качестве плавня.<sup>2</sup> На рис. 26 приводится диаграмма плавкости смеси каолина и магнезита, полученная в результате работ Рикке.

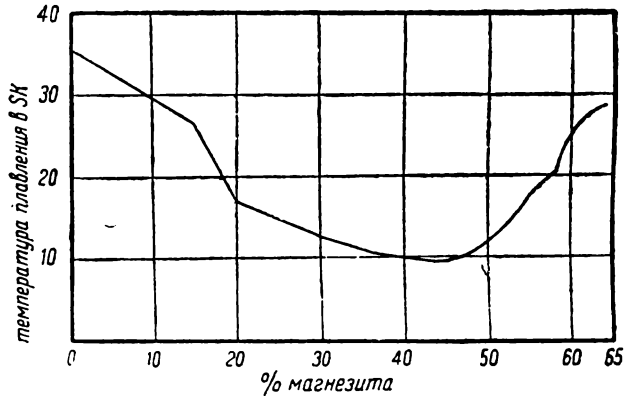


Рис. 26. Диаграмма плавления смеси каолина и магнезита. (Масштаб диаграммы по старой нумерации конусов).

### Окись и закись железа

Окислы железа имеются в большинстве сырых материалов, используемых в керамических производствах, и потому их влияние на процесс образования в обжиге керамического черепка и его качество весьма велико. Железо попадает в массы в самых разнообразных соединениях. Замещающая иногда в глинах и каолинах Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 0,5%), окись железа выделяется в свободном виде при распадении молекул глинистого вещества. Кроме того, железо может попадать в массы в виде окиси, карбонатов, сульфидов, сульфатов, силикатов и др., например: гематита, магнетита, сидерита, пирита, мелантерита, роговой обманки, слюды и др.

Железо в форме окислов или их гидратов способно реагировать с основными компонентами массы при наиболее низких температурах, тогда как железо сульфидов и карбонатов, связанное с серой

<sup>1</sup> Hattinger. Trans. Amer. Cer. Soc., 130, 1903.

<sup>2</sup> R. Riecke. Sprechsaal, 46—48, 1905.

и двуокисью углерода, реагирует при более высоких температурах с освобождением углекислого газа и летучей серы. Окислы железа некоторых силикатов, крепко связанные кремнеземом и основаниями, вступают в новые соединения после разложения силикатов и потому отличаются наименьшей активностью в процессах образования керамического черепка.

Присутствие в массах соединений железа дает окрашивание изделий после обжига, крайне не желательное в некоторых производствах (фарфор и фаянс), причем цвет определяется содержанием железа в массе и условиями обжига (температура и газовая среда). По мере увеличения содержания железа, черепок принимает разные оттенки, начиная от кремового и переходя в желтый, красный, коричневый, бурый.

При одном и том же содержании железа в массах окраска обожженных изделий может варьировать в зависимости от состава плавней и под влиянием окислительного или восстановительного действия печных газов.

Красный цвет и его оттенки определяются наличием в обожженных изделиях (например, в кирпиче и терракоте) свободной окиси железа и ее физической структурой. При температуре спекания окислы железа образуют силикаты и цвет изделий, при значительном содержании окислов железа (выше 4%), переходит в темно-коричневый.

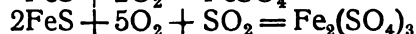
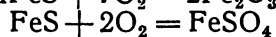
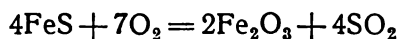
Окрашивание черепка окислами железа начинается при температурах около 500°C.

При этой температуре  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  замещающее  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в водных силикатах выделяется в свободном виде.

Сидерит ( $\text{Fe}_2\text{CO}_3$ ) разлагается с выделением углекислоты в интервале 400—500°C.

Железный колчедан полностью разлагается в окислительной атмосфере с выделением всей серы лишь при температурах порядка 925°C.<sup>1</sup> По Джексону, при температурах не выше 500°C,  $\text{FeS}_2$  сгорает в  $\text{FeS}$  и  $\text{SO}_2$ .

При окислении  $\text{FeS}$  возможны реакции:



Если при окислении  $\text{FeS}_2$  выделяется  $\text{SO}_2$  или  $\text{SO}_3$ , то они частично поглощаются составными частями массы ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и др.), образуя сульфаты.

Разложение сульфата железа происходит, по преимуществу, между 560 и 776°C.

Сера, оставшаяся в массах, может образовывать железистые сульфо-силикаты, которые, бурно разлагаясь при высоких температурах, образуют пузыри и вздутия в массе.

По мнению Зегера, Ортона и Сталей, при высоких температурах сера вытесняется из  $\text{FeS}_2$  кремнекислотой.

Приведенные данные показывают, что при температуре спекания черепка выше 1000°C железо участвует в образовании новых силикатов в виде  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  или при взаимодействии силикатов, в составе которых железо было введено в массу.

---

<sup>1</sup> Jackson, Journ. of the Amer. Cer. Soc., 8, 1924.



Железо может участвовать в образовании силикатов в форме окиси и закиси, при этом окраска обожженного черепка уменьшается, начиная с 500—900°С. В восстановительном пламени (в присутствии СО) восстановление окиси в закись происходит быстрее. По Ле-Шателье, окись переходит в закись при 1300°С.

Ряд исследователей называют другие температуры. В настоящее время еще нет единого мнения и точных данных об условиях восстановления окиси железа.

Из опытов, приведенных Виннисоном<sup>1</sup> и другими исследователями, можно вывести заключение, что процесс восстановления и растворения окиси в силикатах и его скорость определяются содержанием в массах SiO<sub>2</sub>, плавней и характером последних.

При высоком содержании в массах SiO<sub>2</sub> и плавней образование железистых силикатов и обесцвечивание их (ослабление интенсивности окраски) происходит при более низких температурах.

Окрашивание окислами железа крайне нежелательно в фарфоре и фаянсе, поэтому поведению окиси железа в фарфоровых массах всегда уделялось большое внимание. Штарк считает нижним пределом восстановления окиси железа в закись с помощью СО топочных газов температуру 900°С, при которой этот процесс происходит уже достаточно быстро.

Верхним пределом для ряда масс является температура порядка 1050°С, при которой уже начинается частичное флюсование черепка, закрывание пор и, следовательно, прекращается свободный доступ восстановителя (СО) к Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Известен ряд соединений,<sup>2</sup> например SiO<sub>4</sub>Fe<sub>2</sub> (фаялит) с температурой плавления около 1050—1075°С.

В системе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>·FeO окись железа является сильным плавнем<sup>3</sup> и дает эвтектику с температурой плавления 1140°С.

Окись железа также дает с SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ряд легкоплавких силикатов, однако, по мнению некоторых исследователей (Уилер), флюсующий эффект окиси железа проявляется при более высоких температурах (на 65—95° выше закисного). По Рикке, прибавление к глине состава Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2,5SiO<sub>2</sub> эквивалента Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> понижает точку плавления от 1750° до 1610°С.

Силикаты, образовавшиеся из каолинов и кварца с присоединением или растворением закиси железа в небольших количествах (до 2%), имеют синеватую, почти исчезающую окраску.

Свободная окись может получиться, если вслед за восстановительным пламенем перед сплавлением массы и закрытием пор обжиг будет проводиться в окислительной атмосфере.

Закисное железо, связанное в образующихся при спекании черепка силикатах, не может окисляться и потому после закрытия пор обжиг может вестись в нейтральной и окислительной атмосфере.

Неблагоприятное влияние на цвет фарфора и фаянса оказывает содержание в массе двуокиси титана TiO<sub>2</sub>, дающей в окислительном обжиге желтую краску. Титан в соединении с окисью железа усиливает окраску черепка, получаемую в обжиге под влиянием последнего.

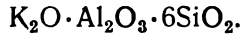
<sup>1</sup> Vinnison. Trans. of the Amer. Cer. Soc., XVI, 136, 1914.

<sup>2</sup> A. B. Searle. Encyclopedia of the Ceramic Industries, VII, 6, 1930.

<sup>3</sup> Riecke. Sprechsaal, 43, 1910.

## Полевой шпат

Полевые шпаты находят в керамических производствах широкое применение для составления масс и глазурей в качестве дешевых и высококачественных плавней. В производстве фарфоровой, фаянсовой и каменной посуды наибольшей популярностью пользуется калиевый полевой шпат — ортоклаз или микроклин, в чистом виде отвечающий формуле:



Калиевый полевой шпат дает в процессе спекания масс весьма вязкое стекло, т. е. отличается густоплавокостью — качеством, весьма ценным в производствах тонкой керамики.

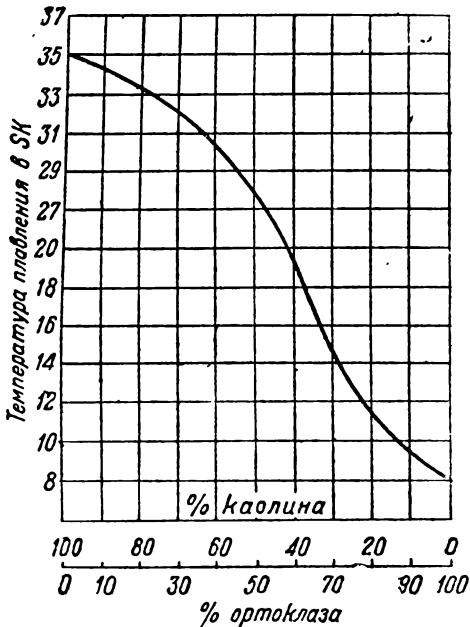


Рис. 27. Диаграмма плавления смеси каолина и полевого шпата

Густоплавокость обеспечивает в процессе спекания черепка достаточную связность между зернами глинисто-кварцевого каркаса и достаточную устойчивость тонких изделий против деформаций (провисанья и кривья) при высоких температурах обжига. Применение в качестве плавней известняков, натриевых, кальциевых шпатов (альбита, анортита и плагиоклазов) в этом отношении дает худшие результаты, хотя некоторые из них являются более активными плавнями, чем ортоклаз. Однако, недостаточные запасы в природе чистых калиевых полевых шпатов вынуждают использовать даже в тонкой керамике натровые, кальциевые и другие шпаты смешанного состава.

В зависимости от состава, полевые шпаты плавятся в интервале 1200—1280° С. Наличие в массах извести понижает температуру их плавления, приблизительно, на 50° С.

Флюсующие свойства полевых шпатов начинают проявляться ранее температуры их плавления. Взаимодействие полевого шпата со свободными щелочными и щелочноземельными окислами, обезвоженным глинистым веществом и зернами кварца начинается, по Штарку, уже при 950° С. Смесь каолина и полевого шпата при нагреве выше 950° приобретает прогрессирующие с повышением температуры признаки спекаемости (повышенную прочность, увеличение усадки и уменьшение пористости) в большей степени, чем нагреваемый до тех же температур чистый каолин (рис. 27).

Примерно с 950° С щелочь полевого шпата начинает химически действовать на кремнезем глинистого вещества, чем и объясняется повышение прочности и усадки смеси каолина и полевого шпата и сокращение пористости.

Около 1200—1250° С полевой шпат плавится с выделением пузырьков газа, в связи с чем в этот период ослабляется связь между

частицами массы и замечается некоторое уменьшение усадки. Выделение газов при плавлении некоторых полевых шпатов сопровождается вспучиванием сплавленной массы. По исследованиям Канца, газ, выделяющийся из полевого шпата при 1200—1300°С является парами воды, которая образуется из водорода при разложении силикатов, природа которых точно еще не установлена (возможно наличие слюды мусковита).

В расплавленном полево шпате растворяется  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ , и черепок сильно остекловывается с возрастанием прочности, плотности и уменьшением его пористости.

Массы, применяемые в тонкой керамике (фарфор, фаянс, каменный товар), содержат каолины, глины, кварц и полево шпат в разнообразных соотношениях, в зависимости от требований, предъявляемых к готовым изделиям, и принятой температуры обжига.

Кварцевые зерна растворяются в расплавленном полево шпате при более низких температурах и с большей скоростью, чем зерна обезвоженного глинистого вещества. Последние, в известной части, остаются не измененными до конца обжига и вместе с образующимися при высоких температурах кристаллами муллита составляют основной каркас, удерживающий изделия от деформации при спекании черепка.

Кварц вместе с полевым шпатом являются основными стеклообразующими элементами.

Чем выше температура и продолжительность обжига, тем большее количество кварца и глинистого вещества растворяется в полево шпате и тем выше прочность получаемого стекла и черепка в целом.

Растворение глинистого вещества в полевошпатовом стекле повышает его вязкость. Наименьшая вязкость полевошпатового стекла с растворенным в нем каолином, по Вильсону, наблюдается дважды: при содержании последнего в количестве 2—3% и при содержании около 10%. Повидимому, в этих пределах образуются эвтектические смеси полевого шпата и каолинита.

В системе  $K_2O-Na_2O-Al_2O_3-SiO_2$  эвтектика, способствующая деформации изделий в обжиге, имеет следующий состав:<sup>1</sup> 0,78  $Na_2O$ ; 0,22  $K_2O$ , 0,20  $Al_2O_3$ ; 3,43  $SiO_2$ .

#### 4. Керамические массы

Процессы, протекающие в массах при высушивании изделий, обусловлены, главным образом, изменениями свойств глинистого вещества при его нагреве и обезвоживании. Остальные компоненты массы — отошающие материалы — играют в этом случае роль инертных наполнителей, не изменяющихся при температурах сушки.

Результаты сушки изделий характеризуются конечным содержанием влаги и сохранением целостности, структуры и правильной формы изделия и еще не определяют качества готовой продукции.

При обжиге в черепке происходят более глубокие изменения, в которых участвуют все компоненты рабочей массы, чем обусловлена сложность протекающих процессов и большое их влияние на свойства и качество готовых изделий.

Процессы, протекающие в керамических массах при их обжиге,

<sup>1</sup> W. N. Butterworth and Kates. Journ. of the Amer. Cer. Soc., 12, 750, 1929.

несмотря на их большую важность, еще недостаточно изучены и потому установление схемы процесса и его цифровых характеристик является весьма сложной и многообразной задачей.

К наиболее важным последствиям обжига относится изменение размеров, а иногда и формы изделий, их пористости, удельного веса и устойчивости против механических, химических, термических и других внешних воздействий.

### Усадка керамических масс в обжиге

Сокращение размеров при температурах обжига обусловлено рядом факторов.

Усадка при температурах от 100° С, примерно, до 800° С происходит вследствие разложения молекул глинистого вещества и выделения химически связанной воды.

Противоположный, хотя и менее значительный, эффект дает кварц, который после 575° С претерпевает модификационные превращения с увеличением объема. Результативное изменение объема масс, вследствие отмеченных противоположных влияний глинистого вещества и кварца, определяются процентным соотношением этих компонентов и конечной температурой нагрева. Большинство керамических рабочих масс имеет в отмеченном интервале температур уменьшение объема. Неравномерный прогрев в этот период крупных изделий служит причиной неодинаковой их усадки в разных местах и образования трещин и деформаций.

Усадка при температурах выше 900—1000° С обусловлена образованием в массах под влиянием плавней стекловидной (весьма вязкой) фазы, которая, проникая в поры и обволакивая отдельные частицы глинистого вещества и кварца, способствуют их сближению и сокращению объема массы под влиянием молекулярных сил.

Величина усадки при нагреве выше 1000° С определяется количеством плавней, их составом, температурой и продолжительностью нагрева массы, так как от этих факторов зависит степень оплавления черепка и образования в нем кристаллических силикатов.

Усадка масс с большим содержанием плавней (например, фарфор, каменный товар) при нагревании свыше 1000° С проходит с прогрессирующей скоростью по мере подъема температуры и может быть причиной возникновения разнообразных дефектов продукции.

Исследование усадки фарфоровой изоляторной массы в обжиге с разным подъемом температуры, от 35° С в час и до 95° С, дали результаты, показанные в таблице 14.<sup>1</sup>

При быстром подъеме температуры максимум усадки перемещается в сторону более высоких температур, что показывает зна-

<sup>1</sup> Исследованию подвергалась масса следующего состава:

Каолин глуховецкий . . . . .	8%
Губинская глина (мыловка) . . . . .	23 "
Фарфоровый череп . . . . .	20 "
Мел . . . . .	1 "
Песок люберецкий . . . . .	22 "
Полевой шпат . . . . .	26 "
Итого . . . . .	100%,0

### ИЗМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ УСАДКИ ФАРФОРОВОЙ ИЗОЛЯТОРНОЙ МАССЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ НАГРЕВАНИЯ

Скорость подъема температуры в 1 час	Температура обжига в °С									
	600	700	800	900	1000	1100	1200	1250	1300	от 1380 до 1420
35	—	0,4	0,2	0,1	0,8	5,5	6,65	8,31	7,80	4,5
55	0,2	0,3	0,2	0,0	0,2	1,37	6,14	8,77	—	9,25
75	0,2	0,4	0,4	0,3	0,2	1,09	6,73	—	8,23	7,92
95	0,4	0,3	0,4	0,2	0,0	0,5	5,75	—	8,30	4,4

чительное влияние времени на прохождение процесса оплавления черепка и на образование стекловидной массы.

Резкое уменьшение усадки при конечных температурах обжига обусловливается выделением газов из стекловидного сплава и вспучиванием массы.

#### Спекание массы и прочность черепка

Изделия, находящиеся в стадии некоторого размягчения, редко дают трещины под влиянием напряжений усадки, но зато в этот период изделия очень часто растрескиваются и деформируются под влиянием собственного веса. В этом отношении крупнейшее значение имеет так называемый интервал между температурой спекания массы и температурой плавления (ее огнеупорностью). Термином „спекание массы“ обозначается состояние черепка, при котором уже наступило частичное сплавление массы. Понятием „огнеупорность массы“ определяется температура, при которой изготовленный из этой массы тетраэдр (конус Зегера) начинает изгибаться или садиться. Чем меньше интервал между температурами спекания и огнеупорностью, тем труднее получить из этой массы изделия со спекшимся черепком и сохранением правильной формы, отвечающей заданию.

Величина интервала зависит от вязкости сплавов (стекло), получаемых при обжиге масс. Высокое содержание в массах  $Al_2O_3$  увеличивает вязкость жидкой фазы, а, следовательно, и интервал между их спеканием и началом плавления (деформацией).

Кроме изменения внешних размеров, при обжиге видоизменяется структурное строение массы. По мере дегидратации глинистого вещества и разложения углекислой извести, увеличивается пористость масс, приблизительно до  $800^\circ C$ , после начинается уменьшение пористости.

Спекание черепка и количественная характеристика этого процесса определяются составом массы (процентным соотношением глинистого вещества, кварца, шамота и разных плавней), характером обжига (конечной температурой обжига, его продолжительностью и кривой) и тониной размолта компонентов массы.

Изменение свойств керамических масс в обжиге в пределах до  $1000^\circ C$  обусловлено, главным образом, поведением глинистого вещества, претерпевающего в этом температурном интервале наибольшие изменения.

Типичным примером является изменение прочности на разлом

образцов из цетлицкого каолина, когорый, по Штарку, дает наибольшие потери гидратной влаги в интервале 450—600° С.

Как видно из диаграммы (рис. 28), при нагреве до 700° С прочность образцов постепенно возрастает; дальше, при нагреве от 700 до 800° С, прочность падает и потом опять повышается. Особенно быстро растет прочность образцов цетлицкого каолина при нагреве от 1000° С и выше под действием плавней, реагирующих с каолином и кварцевыми зернами и цементирующих конгломерат частиц, составляющих керамическую массу.

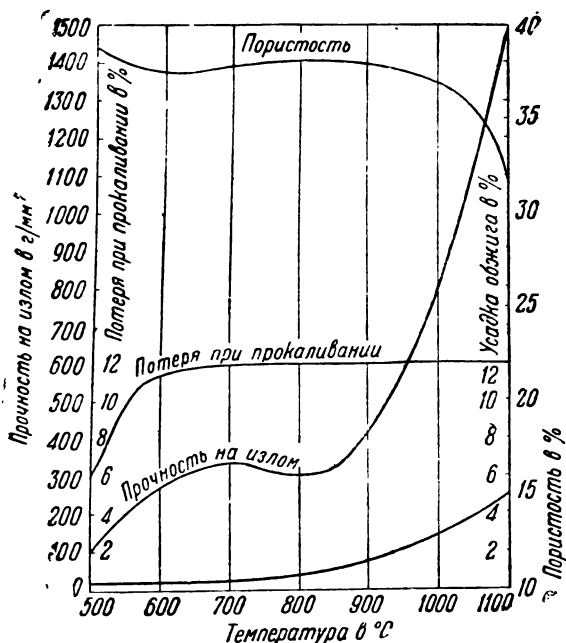


Рис. 28. Изменение прочности и пористости цетлицкого каолина в обжиге

выше 1000° С в массах начинается образование силикатов щелочных и щелочноземельных материалов, которые при дальнейшем повышении температуры плавятся и растворяют зерна кварца и глинистого вещества. Наибольшее значение процесс спекания черепка имеет в производствах тонкой керамики (фарфор, фаянс, каменная посуда и т. п.), где важнейшие качества продукции получаются в результате удачного проведения этой стадии обжига.

Отмеченная выше фарфоровая изоляторная масса, в зависимости от конечной температуры обжига и скорости (продолжительности) подъема температуры, имеет различную прочность и пористость.

В таблице 15 прочность подвергавшихся испытанию образцов определялась по временному сопротивлению на разрыв, а пористость — по объему открытых (кажущаяся пористость) и всех имеющихся пор.

В производстве фарфоровой посуды, изоляторов и санфаянса, пожалуй, более, чем в других отраслях керамики, требуется выдер-

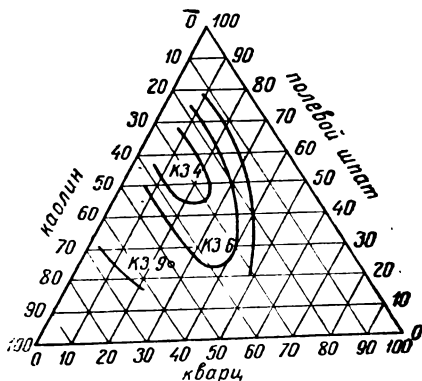


Рис. 29. Изотермы получения спекшихся фарфоровых масс разного состава

ЗАВИСИМОСТЬ ПОРИСТОСТИ И ПРОЧНОСТИ (ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЧЕРЕПКА РАЗРЫВУ в кг на 1 см<sup>2</sup>) ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОБЖИГА

Полем температуры в 1 час в °С	Свойства черепка	Конечная температура обжига в °С								
		600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	от 1350 до 1420
35	Открытая пористость . . . . .	—	32,53	34,43	34,37	32,88	12,13	5,53	0,75	19,87
	Истинная пористость . . . . .	—	—	—	34,46	32,99	17,96	13,39	—	—
	Прочность . . . . .	6,40	9,91	6,34	13,00	23,40	46,70	229,0	210,0	—
55	Открытая пористость . . . . .	—	—	34,00	35,06	33,55	26,42	10,06	0,63	15,9
	Истинная пористость . . . . .	—	—	—	—	33,86	31,03	16,49	—	—
	Прочность . . . . .	4,50	9,10	7,00	5,50	9,60	24,00	120,0	187,7	232,2
75	Открытая пористость . . . . .	—	33,56	—	35,09	—	27,36	—	5,25	0,56
	Истинная пористость . . . . .	—	—	—	—	34,25	33,60	22,33	—	—
	Прочность . . . . .	7,85	7,92	—	2,85	5,25	24,70	90,0	124,5	123,0
95	Открытая пористость . . . . .	—	33,92	33,16	34,55	36,70	28,80	4,50	15,99	25,01
	Истинная пористость . . . . .	—	—	—	—	36,90	33,20	9,18	—	—
	Прочность . . . . .	6,55	7,51	—	8,65	6,50	8,85	50,30	—	17,30

жать спекание черепка в тесных пределах для того, чтобы обеспечить наибольшую прочность изделий, не нарушая их формы и не увеличивая расходы на обжиг.

Изотермические кривые температур обжига, при которых из фарфоровых масс разного состава можно получить спекшийся черепок, показаны на диаграмме (рис. 29).

### Структура черепка

В спекшемся черепке керамической массы, как правило, обнаруживаются следующие структурные элементы: сплав силикатов (стекло) разнообразного состава, зерна наиболее огнеупорных компонентов (например, каолина и кварца), не растворившихся в стекле и не участвовавших в образовании новых силикатов, и кристаллические новообразования (муллит и др.).

Количество образующегося при обжиге сплава зависит от температуры обжига и его продолжительности.

Количество и величина образующихся в черепке кристаллов возрастают с повышением температуры обжига и продолжительности теплообработки.<sup>1</sup>

Состав стекла, образующегося в черепке, меняется по мере

<sup>1</sup> А. В. Реск. Journ. of the Amer. Cer. Soc., 2, 1919.

ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРЕ ОБЖИГА И

№№ обжи- га	Период большо- го огня		Период выдержки		Кварц, введенный в массу в %	Кварц, рельефно выраженный в шлифах в %	Средний размер кварца в м.м	Количество участ- ков с кристал- лами муллита $M_2$ и $M_3$ в %	Количество за- крытых пор в %	Средний размер закрытых пор в м.м
	темпера- тура обжига в °С	продолжи- тельность в час	средняя темпера- тура в °С	продолжи- тельность в час						
21	1380	11	865	9	29	12,5	0,014	16,0	0,1	0,005
17	1350	7	880	7	29	15,0	0,017	2,2	0,4	0,008
11	1380	7	1000	5,5	29	15,2	0,014	18,0	0,3	0,004

повышения температуры и удлинения обжига, вследствие растворения в нем более огнеупорных компонентов массы; соответственно меняются его химические и физические свойства.

Количество полевошпатового стекла в твердом фарфоре колеблется, по данным Рикке, Целлера и других исследователей, в пределах 40—60%; в мягком фарфоре стекла больше, чем в твердом.

Состав скелета массы (зерна  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  и кристаллы муллита) при спекании черепка непрерывно изменяется; постепенно в сплаве растворяется кварц и увеличивается содержание кристаллических силикатов (силиманит, муллит).

Конечный химический состав отдельных элементов спекшегося черепка и его структура определяются не только составом массы, но и, главным образом, продолжительностью и температурами обжига.

Наиболее сложные изменения происходят в черепке в тех случаях, когда под влиянием высоких температур развивается процесс частичного сплавления (спекание) массы, например при обжиге фарфора.

Конечная температура, продолжительность и скорость подъема температуры в разных стадиях обжига определяют структуру, физико-химические свойства черепка и разные дефекты, снижающие качество продукции.



## СТРУКТУРЕ ФАРФОРОВОГО ЧЕРЕПКА

Форма закрытых пор в шлифе	Количество о закрытых пор в шлифе в %	Средний размер открытых пор в мм	Форма открытых пор в шлифе	Внешний вид изоляторов
Закрытые поры, средней крупности, округлой формы. Распределены равномерно. Участки $M_2$ часты. Встречаются участки $M_3$	7,9	0,031	Половина пор — мелких, с оплавленными краями, округлой формы. Изредка встречаются поры до 0,400 мм, имеющие короткие отростки, распределенные равномерно	Хороший, без дефектов
Поры округленные и эллипсовидные; попадаются поры в стадии слияния. Распределены равномерно. Довольно часты участки $M_2$ . Встречаются участки $M_3$	9,0	0,031	Шлиф дырчатый; крупные поры до 0,4 мм нередки и не имеют определенной формы. Основная масса пор — округлой формы; мелкие поры — с оплавленными краями; распределенные равномерно	Изоляторы с дефектами — прыщом
Поры мелкие и средней крупности, округлые и эллипсовидные. Распределены равномерно	24,0	0,061	Поры неправильной формы, с оплавленными краями; много мелких пор округленной формы	Изоляторы со вспучиваниями в черепке

Процесс удаления гигроскопической и гидратной воды должен производиться при условиях, обеспечивающих полное удаление влаги до начала закрытия пор и без образования трещин, иногда появляющихся в результате неравномерной усадки изделий. Первый период обжига фарфора и некоторых других изделий завершается так называемой выдержкой температуры, примерно на одном уровне, имеющей целью подравнять температуру во всех пунктах печной камеры и закончить процесс дегидратации. Во втором этапе обжига фарфора в период так называемого „большого огня“, под влиянием высоких температур масса начинает размягчаться, что в конечном итоге должно дать плотный, спекшийся черепок. От взаимодействия плавней на кварц и глинистые материалы под влиянием высоких температур образуется стекловидная вязкая фаза и кристаллические новообразования (муллит). Одновременно с этим постепенно меняют свою форму и заплываются имеющиеся в черепке поры, сокращаются размеры и происходит большая или меньшая деформация изделий. Образование муллита в виде кристаллов разной величины и переплетающихся групп протекает в зависимости от температуры и развития стекловидной массы в черепке.

В таблице 16 приведены некоторые данные о характере обжигающихся изоляторов из вышеотмеченной массы и характеристика полученного в результате опытных обжигов структурного строения черепка отдельных образцов.

Изучение структуры производилось путем микроскопического исследования шлифов.<sup>1</sup> Образование муллита в виде мелких кристаллов отмечено на месте расплавленных зерен полевого шпата в которые дифундировали  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Эти участки обозначены символом  $M_2$ . Более крупные кристаллы муллита, образовавшиеся в составе основной массы черепка, обозначены буквой  $M_3$ .

В результате ряда опытов, выяснилось значение „выдержки температур“ для масс отмеченного выше типа. Для данного состава изоляторной массы и размеров изделий температура „выдержки“ должна находиться в пределах  $860\text{—}900^\circ\text{C}$  и поддерживаться, в зависимости от размеров печи, 7—9 час.

### Зависимость структуры черепка от продолжительности температуры обжига

Плотность черепка, механическая и диэлектрическая прочность и характер остающихся пор определяются взаимным сочетанием высоких температур и продолжительности заключительной части обжига.

Влияние продолжительности обжига на структуру и свойства черепка в последние годы подвергалось детальному изучению.

Нортон и Ходгтон<sup>2</sup> опубликовали исследования о влиянии времени на температуру спекания ряда типичных керамических масс, образцы которых подвергались испытанию в лабораторной газовой печи при разных температурах и продолжительности обжига. Проведены четыре градации обжига: в течение 10, 100, 1000 и 10 000 мин. (167 час.). Состав масс (по сухому весу) приведен в таблице 17.

Таблица 17

СОСТАВ ПРОБНЫХ МАСС

Материал	Электрофарфор № 1	Санитарные изделия № 2	Фаянс цвета слоновой кости № 3	Фаянс белый № 4	Фарфоровая посуда со спекшимся черепком № 5	Фарфор № 6
Каолин . . . . .	20,6	24,5	21,6	34,0	39,0	30,0
Пластичная глина (английская) . . . . .	26,0	25,5	35,4 *	20,3 *	7,0	10,0
Кварц . . . . .	18,6	24,0	32,7	33,2	38,5	—
Полевой шпат . . . . .	34,8	25,5	10,3	12,5	14,0	60,0
Мел . . . . .	—	0,5	—	—	1,5	—

\* Содержит 126 % воды.

Печь с образцами доводилась до заданной температуры, приблизительно, в течение 80 мин. и затем температура удерживалась на одном уровне 10, 100, 1000 и 10 000 мин.

Степень спекания масс устанавливалась по усадке и пористости образцов, как наиболее точным показателям.

<sup>1</sup> Исследование проведено в Минералогической лаборатории ВНИИК научным сотрудником Курпьяновой.

<sup>2</sup> Journ. of the Amer. Cer. Soc. 3, 1931.

Как это видно из приведенных диаграмм (рис. 30, 31 и 32), исследование показало, что удлинение нагрева дает полное или частичное спекание черепка при температурах более низких, чем при непродолжительном нагреве образцов. В массе электрофарфора (№ 1) максимальные усадки были достигнуты:

при обжиге	10 мин.	около	1300 °С
:	100	:	1200
:	1 000	:	1175
:	10 000	:	1120

Исследование шлифов образцов, обожженных в течение разных промежутков времени, показывает разницу структуры черепка.

В массе электрофарфора (№ 1), обожженной в течение 17 мин. до 1150°С, только начинается плавление полевого шпата. Зерна кварца не имеют никаких признаков сплавления. Пористость массы 9<sup>1</sup>/<sub>0</sub>.

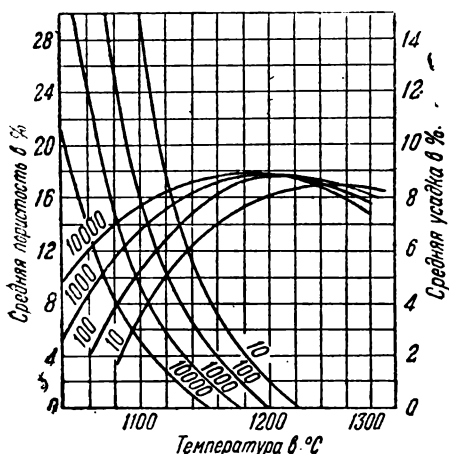


Рис. 30. Масса электрофарфора

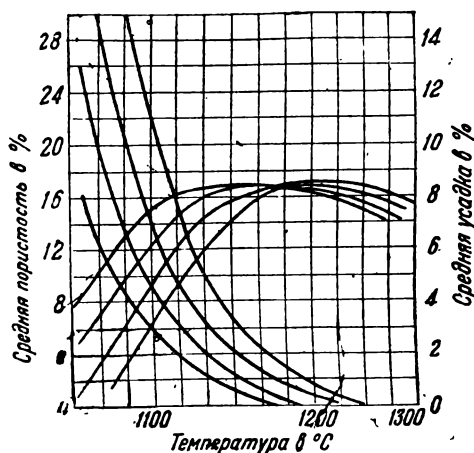


Рис. 31. Масса санитарных изделий (со спекшимся черепком)

Нагрев второго образца в течение 10 мин. до 1250°С дает почти полное расплавление полевого шпата, кварц остается еще без заметных оплавлений (сохраняет острые края зерен). Полевошпатовый сплав, вследствие высокой (при данной температуре) вязкости, еще не проникает в поры черепка. Кристаллических образований нет. Образец, обожженный в течение 100 мин. до 1200°С, имеет в общем структуру, сходную со структурой, обработанной при 10 мин. до 1250°С. Обжиг в течение 1000 мин. уже при температуре 1175°С дает иную структуру, а именно: зерна кварца частично растворены в полевошпате с увеличением количества сплава. Водопоглощаемость — 0%. Прочность образцов выше, чем у обожженных за 10 и 100 мин.

Образец, обожженный в течение 10 000 мин. при температуре 1120°, имел структуру, сходную с предыдущим образцом.

Образцы, приготовленные из массы для санитарных изделий, при обжиге в условиях, сходных с вышеотмеченным обжигом образцов электрофарфора, имели почти одинаковую с последним структуру.

Исследование шлифов бескварцевого фарфора (№ 6) („поросского“) показало структуру черепка, отличную от образцов электрофарфора, хотя роль более продолжительного обжига и здесь так же ясно обозначалась.

При нагревании образцов в течение 10 мин. до 1200 и 1250° С получилось частичное и полное плавление полевого шпата без сплавления зерен кварца, попавших в массу вместе с полевым шпатом.

Образцы, обожженные в течение 100 мин. при 1180° С и 1000 мин. при 1140° и 1175° С, по структуре мало отличались от двух предыдущих. Обжиг в течение 10 000 мин. уже дает структуру со сплавлением мелких зерен кварца и образованием кристаллов муллита.

Микроскопическое исследование шлифов показывает, что первое образование муллита во всех образцах происходит в полевошпатовом

стекле и не выходит за границы расплавленных его зерен. Нагрев одного лишь шпата в течение 1000 мин. до 1230° С и охлаждение, подобно образцам фарфора, не дало образования кристаллов муллита.

Наиболее вероятным является предположение, согласно которому муллит образуется из глинистого вещества, из которого при воздействии полевого шпата выделяется аморфный муллит (кристаллообразующийся в дальнейшем)  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  и полевошпатовое стекло, обогащенное  $\text{SiO}_2$ .

Для объяснения причин образования муллита при продолжительном воздействии низких температур выдвигается предположение о диффузии  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в полевошпатовое стекло до выделения из него кристаллических соединений (муллита или силиманита).

Приведенные экспериментальные данные подчеркивают общеизвестную роль фактора времени в образовании стекло-массы и кристаллических силикатов в период спекания черепка.

Жесткие требования, предъявляемые к отдельным видам керамической продукции, могут выполняться лишь при получении черепка со структурой, отвечающей этим требованиям в достаточной степени.

Поэтому основной задачей производства является назначение такого режима обжига, который обеспечивал бы выпуск высококачественной продукции при оптимальном сочетании температуры и продолжительности обжига.

Продолжительный обжиг при высоких температурах является одной из причин повышения себестоимости продукции.

Вопрос о выгоде продолжительного обжига при невысоких температурах или же, наоборот, более быстрого обжига при более высокой температуре, даже при получении в обоих случаях продукции одинакового качества, не может решаться в общем виде для разных производств и типов печей. Эта сложная и важная проблема еще требует дополнительного техно-экономического исследования в соответствии с возможностями использования высококачественного топлива (газ, мазут) и наиболее совершенных туннельных печей.

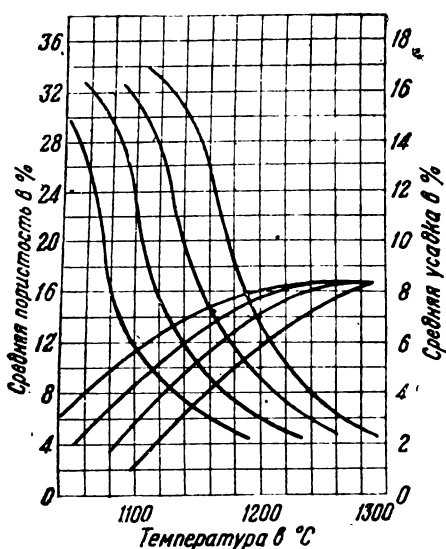


Рис. 32. Фаянсовая масса (тип полуфарфора)

## ГЛАВА ВТОРАЯ

### ТОПЛИВО, ЕГО СЖИГАНИЕ И ГАЗИФИКАЦИЯ

#### I. Методы получения тепловой энергии и высоких температур

Все керамические предприятия являются крупными потребителями тепла, используемого для проведения двух основных производственных процессов: сушки и обжига.

Расход тепла на химические процессы, протекающие при обжиге керамических масс, незначителен.

Фарфоровые и фаянсовые изделия в конечной стадии обжига должны нагреваться до высоких температур порядка 1100—1500°С, чем обуславливается низкий температурный перепад (разница температур) между горячими газами и раскаленными изделиями и связанные с этим замедление процесса обжига и большие тепловые потери.

Медленное поглощение тепла изделиями в процессе обжига и большие тепловые потери вызываются еще и малой теплопроводностью фарфора и фаянса.

Как низкая теплопроводность, так и высокая конечная температура обжига обусловлены основными свойствами керамического черепка, а иногда и специальными техническими требованиями, предъявляемыми к выпускаемой продукции. Поэтому важнейшей задачей керамиков и теплотехников, работающих в керамическом производстве, является изыскание дешевых способов получения тепловой энергии и высоких температур, максимальное использование тепла в самих процессах обжига и сушки, а также утилизация тепловых отходов в самом производстве и на вспомогательные нужды (отопление и пр.).

Современное бытовое и промышленное потребление топлива весьма возросло. Особую важность приобретают различные источники получения энергии, из которых наиболее изученным и дешевым в эксплуатации является так называемый „белый уголь“ — энергия падения воды. Уже в глубокой древности эта энергия использовалась для привода мельниц, крупорушек и тому подобных примитивных машин.

В современных условиях энергия водопадов и течения рек используется для получения электрического тока с помощью весьма эффективных гидроэлектрических установок.

При возможности обжига с помощью электрического тока, вопрос о его преимуществах решается техно-экономическими расчетами,

в которых, кроме стоимости топлива и электрической энергии, должны учитываться остальные эксплуатационные расходы при обоих вариантах обжига.

При пользовании дешевой электрической энергией, получаемой на гидроэлектрических установках, электрические печи могут оказаться выгоднее в эксплуатации, чем наиболее совершенные пламенные печи.

При пользовании током от электростанций, работающих на топливе, вряд ли можно добиться выгодной работы электрической печи, так как в этом случае получается ряд потерь при превращении энергии топлива — сначала в механическую (котел-турбина) потом в электрическую (генератор тока) и, наконец, в тепловую — в элементах сопротивления (где тепло уже расходуется на обогревание изделий). Для получения окончательного коэффициента полезного использования энергии топлива при таких многократных ее превращениях нужно учесть потери при всех этих превращениях и при передаче энергии от места ее выработки к электрическим печам.

В лучших современных установках общий коэффициент использования потенциальной энергии топлива при работе на твердом или жидком топливе колеблется в пределах от 10 до 32%.

Экономический эффект самой электрической печи, вследствие устранения потери тепла с отходящими газами, выше чем у современных пламенных туннельных печей, примерно, на 10—20%.

В настоящее время, когда производство электроэнергии еще базируется, главным образом, на сжигании топлива и не изысканы методы более эффективного использования этой энергии в условиях обжига керамических изделий, — основным типом теплоустановок в керамических производствах остаются пламенные печи.

Электрические печи при дешевой электрической энергии применяются пока лишь для обжига глазурированного фаянса и полуфарфора, а также для декорированных изделий, так как обжиг таких изделий требует температуры от 900 до 1200°С.

## II. Топливо

Из всех видов топлива наиболее раннее и широкое применение в керамических печах получили дрова, которые не утратили своего значения для этой промышленности (хотя и в значительно сокращенном размере) и в настоящее время. В связи с расширением добычи угля, торфа и нефти, дрова стали уступать свое место последним; в настоящее время потребление дров в керамической промышленности составляет не более 25—30% общего расхода топлива. Помимо этих видов топлива в США широко применяется естественный газ, который выделяется из скважин в районах залегания нефти, являясь весьма удобным топливом в керамической промышленности. В СССР тоже имеются выходы газа на поверхность (в Дагестанской АССР на естественном газе работает стекольный завод „Дагестанские Огни“). Естественный газ может легко транспортироваться по трубопроводам на большие расстояния и потому при организации керамических заводов в районах, примыкающих к нефтеносным участкам, необходимо учитывать возможность его применения.

### 1. Дрова

Качество дров и выгодность их использования в керамическом производстве определяется по породам и по содержанию в них влаги. Влияние этих двух факторов далеко не равнозначуще.

Сухая древесина разных пород имеет весьма сходный состав с незначительным колебанием в содержании двух основных составляющих — клетчатки и лигнина. Содержание в дровах сахара, жиров и смол, заключающихся в клеточках, сосудах и межклеточных ходах, хотя и колеблется в широких пределах, но, как это видно из приведенной таблицы 18, не может оказать существенного влияния на химический состав, а следовательно и на теплотворную способность топлива.

Таблица 18

СОСТАВ ДРЕВЕСИНЫ

Порода дерева	Химический состав			Клетчатка	Лигнин	Вода	Жиры и смолы	Сахар
	С°	Н°	О° + N°					
	в процентах							
Береза . . . . .	49,4	6,3	44,3	55,62	28,11	12,48	1,14	2,65
Ель . . . . .	49,6	6,4	44,0	55,99	26,91	13,87	0,97	1,26
Сосна . . . . .	50,2	6,0	43,8	53,27	28,18	12,87	1,63	4,05
Среднее для смеси разных пород . . . . .	49,9	6,3	43,8	—	—	—	—	—

Клетчатка имеет установленный химический состав  $C_6H_{10}O_5$ . Лигнин — вещество, связующее и пропитывающее волокна клетчатки. Элементарный состав лигнина (строение которого мало изучено) следующий: углерода 54—58%; водорода 5,8—6,3%, кислорода 35—39%.

Незначительное колебание содержания в сухой древесине основных частей — клетчатки и лигнина — дает соответственно небольшие изменения в теплотворной способности разных пород дерева: сосна — 4892 кал, береза — 4805 кал, дуб — 4738 кал.

Для приблизительных подсчетов, а также для топлива смешанного состава можно принять теплотворную способность абсолютно сухой древесины равной, в среднем, 4800 кал.

При правильном использовании лесов, на дрова распиливаются отходы древесины, оставшиеся после отбора лучших кряжей на нужды строительной, деревообделочной, бумажной, спичечной и других отраслей промышленности.

Поступающие на заводы дрова имеют, по преимуществу, смешанный и переменный состав по породам, поэтому использование в практической работе по тепловому хозяйству данных о средней теплотворной способности дает достаточно точные показатели работы установок в пределах, принятых на заводах систем учета и статистики.

Несравненно большее значение имеет содержание в топливе балласта — воды и золы.

Содержание воды в свежесрубленных деревьях, в зависимости от времени заготовок, колеблется от 40 до 60% к весу сухой древесины.

При вылеживании в лесу или на складах в течение одного — полутора лет получают воздушно-сухие дрова с влажностью порядка 15—25%.

От долгого пребывания дров в воде, например при сплаве, их

влажность весьма повышается, некоторые породы впитывают воды до 150% от веса абсолютно сухой древесины.<sup>1</sup>

Вода, впитанная сухими дровами при сплаве, удаляется при сушке значительно быстрее, чем влажность свежесрубленных дров, и потому дрова весеннего или ранне-летнего сплава, обычно, успевают к зиме высохнуть до влажности в 15—25%, допускающей экономичное их использование в керамической промышленности.

При сплаве часть органических веществ топлива вымывается водой (выщелачивается), и потому вес органической массы топлива и теплопроизводительность объемной единицы топлива уменьшается (на 5—8%).

Содержание золы при сплаве увеличивается с 1½—2% до 3—5% за счет налипания на дрова ила и песка, что приводит к понижению теплотворной способности весовой единицы топлива.

Покупка, расход и учет топлива производятся по объему, так как частое изменение влажности под влиянием осадков и колебания влажности атмосферы (гигроскопичность дров) не позволяет пользоваться весовым определением количества топлива. С повышением влажности вес топлива повышается, а использование энергии топлива, наоборот, понижается. Поэтому подсчет расхода топлива по весу производится в единицах условного топлива с теплотворной способностью в 7000 кал с помощью переводных коэффициентов, установленных для дров в соответствии с их влажностью, по специальным номограммам (см., например, номограмму на рис. 33).

При переводе объемных замеров топлива в весовые единицы необходимо принятые нормы проверять пробным взвешиванием штабелей, так как вес 1 м<sup>3</sup> может меняться, в зависимости от толщины и формы поленьев, а также от уменья укладчиков.

Истинный удельный вес древесины почти одинаков у всех пород древесины и колеблется около 1,5.

Древесина весьма пориста, поэтому кажущийся удельный вес (объемный со включением пор) колеблется от 0,75 до 1 для свежесрубленных дров и от 0,50 до 0,75 для воздушно-сухих.

Вес 1 м<sup>3</sup> дров при нормальной укладке и длине полена в 0,5 м для разных пород с достаточным приближением приведен в таблице 19 (Техническая энциклопедия, т. 7, стр. 252).

Таблица 19

ВЕС СУХИХ И СЫРЫХ ДРОВ

Порода дров	Вес 1 м <sup>3</sup> нормально уложенных дров в кг	
	Сухие (25% влажности)	Сырые (50% влажности)
Дубовые . . . . .	540	675
Березовые . . . . .	470	590
Ольховые . . . . .	390	490
Сосновые . . . . .	390	505
Липовые . . . . .	380	470
Осиновые . . . . .	360	455
Еловые . . . . .	355	465

<sup>1</sup> См. Д. А. Чернобаев. Топливо, его горение и общие методы расчёта заводских печей, ГТИУ, 1933.



Повышение влажности топлива понижает его теплотворную способность. При этом уменьшается содержание органической горючей массы в весовой единице топлива и одновременно в процессе горения увеличивается расход тепла на превращение воды в пар.

Для обжига керамических изделий требуются высокие температуры горения топлива и равномерное нагревание печной камеры (или канала) по всему сечению.

Поэтому для нормальной работы керамических печей необходимы сухие дрова и притом дрова, дающие при горении длинное пламя.

Особенно важно выполнение этих требований для работы крупных однокамерных печей периодического действия, в которых достижение равномерности обжига продукции является довольно сложной задачей.

Длина пламени зависит от содержания летучих веществ в топливе и условий его сжигания. В круглых фарфоровых и фаянсовых горнах такие породы как сосна, ель, ольха дают наиболее длинное пламя и равномерный обжиг продукции.

На некоторых заводах в результате неправильной организации их работы истощились запасы воздушно-сухих дров, и обжиг продукции в печах периодического действия производился на свежесрубленных или недавно выгруженных из воды сплавных дровах.

При сырых дровах продолжительность обжига доходит до 70 час. (вместо нормальных 24 час.) при неудовлетворительном качестве изделий, чрезвычайно высоком расходе топлива, повышении износа капселей и соответствующем уменьшении оборачиваемости и производительности печей. В некоторых случаях влажность дров доходит до пределов, при которых нельзя получить температур, превышающих заданную температуру нагрева продукции, и тогда работа печи протекает в условиях крайне невыгодного устойчивого равновесия, когда все тепло, развиваемое в топках, идет на покрытие тепловых потерь.

В таких условиях можно продолжать обжиг неопределенно долгое время, не получая ни одного килограмма годной продукции.

Случаи незаконченного обжига из-за чрезвычайно высокой влажности топлива встречаются на практике редко, но работу на дровах с влажностью, значительно превышающей нормальную (25—30%) можно встретить довольно часто, хотя это крайне невыгодно для предприятия.

Обжиг керамической продукции следует производить на дровах, высушенных в естественных условиях или в сушилках, или на ином топливе, если его применение выгоднее дровяного.

Дрова сжигаются непосредственно в топках или предварительно превращаются в генераторный газ, при производстве которого получается ряд весьма ценных отходов (смола и подсмольные воды).

Определение веса 1 м<sup>3</sup> дров, их калорийности и переводного коэффициента на условное топливо по заданной влажности дров и содержанию в них березы можно, с известным приближением, производить по номограмме рис. 33.

## 2. Торф

Торф образуется на болотах и в других мелких водоемах из отмирающих ежегодно растений при медленном разложении их под водой. Постепенно накапливаясь, торфяная масса уплотняется, заполняет водоем и покрывается сверху мхом, который также превра-

щается в торф. В результате дальнейшего разложения и уплотнения торф может превратиться в бурый или каменный уголь, в зависимости от условий залегания и продолжительности процесса разложения. В ряду других ископаемых торф по своему составу наиболее близко подходит к древесине, от которой отличается большим содержанием углерода, в связи с чем перевод обжига керамических изделий с дров на торф не встречает никаких затруднений.

Наиболее ценным топливом является старый торф (так называемый „смоляк“), имеющий вид однородной черно-бурой массы.

При разработке торф содержит, обычно, не меньше 80—90% воды. По способу добычи и обработки различают торф кусковой (ручной формовки, машинноформовочный), фрезерный (состоящий из мелких кусочков и рыхлых скоплений) и гидроторф.

Влажность торфа нормальной воздушной сушки 20—30%; золы содержится в разных торфах, в зависимости от глубины залегания, от 5 до 15% и выше.

Торф центральной части СССР содержит меньше золы, чем украинский. В зависимости от глубины залегания, содержание золы в торфе колеблется, приблизительно, в пределах, приведенных в таблице 20.

Таблица 20

СОДЕРЖАНИЕ ЗОЛЫ В ТОРФЕ

Глубина залегания торфа в м	Содержание золы в % к весу сухого вещества (приблизительно)
1,5	5,8
2,5	6,3
3,5	7,4
5,5	8,6
7,5	10,7
9,5	12,7
11,5	36,7
Дно болота	97,2

Состав органической массы торфа, в зависимости от возраста его, колеблется в следующих пределах: С 44—60%; Н 3,5—9,5%; О 30—38%; N 1—2,5%.

Теплопроизводительность (низшая) торфа, в зависимости от зольности и влажности, колеблется в широких пределах. В таблице 21 показано изменение состава типичного торфа и его калорийности, в зависимости от изменения влажности.

Торф сжигается непосредственно в топках или перерабатывается в газогенераторах для получения газа и ценных отходов (смола, уксусная кислота и другие вещества и их производные).

Вес 1 м<sup>3</sup> кускового торфа, в зависимости от качества, влажности и укладки, колеблется в пределах 330—400 кг при влажности, равной 25%.

СССР имеет колоссальные запасы торфа, исчисляемые в переводе на условное топливо, примерно, в 170 млрд. т с ежегодным приростом около 300 млн. т. Общий запас торфа в обследованных торфяниках Европейской части Союза исчисляется, примерно, в 30 млрд. т условного топлива.

**ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОГО СОСТАВА И ТЕПЛОТВОРНОЙ СПОСОБНОСТИ  
ТОРФА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ**

W	C <sup>P</sup>	H <sup>P</sup>	S <sup>P</sup>	N <sup>P</sup>	O <sup>P</sup>	A <sup>P</sup>	Q <sub>H</sub> <sup>P</sup>	Переводный коэффициент на условное топливо
в п р о ц е н т а х							кал/кг	
0	53,35	5,30	0,27	2,38	30,20	8,50	5446	0,778
5	50,63	5,05	0,26	2,26	28,72	8,08	4571	0,653
10	48,00	4,76	0,25	2,14	27,20	7,65	4299	0,614
15	45,33	4,53	0,24	2,02	25,65	7,23	4035	0,564
20	42,65	4,25	0,22	1,90	24,18	6,80	3737	0,534
21	42,17	4,20	0,22	1,88	23,83	6,70	3669	0,524
22	41,60	4,14	0,21	1,85	23,60	6,60	3648	0,521
23	41,12	4,08	0,21	1,83	23,26	6,50	3597	0,514
24	40,52	4,04	0,21	1,81	22,96	6,46	3541	0,506
25	40,04	3,98	0,21	1,78	22,62	6,37	3490	0,498
26	39,44	3,92	0,20	1,76	22,33	6,30	3426	0,489
27	39,00	3,87	0,20	1,73	22,00	6,20	3382	0,483
28	38,40	3,82	0,20	1,71	21,76	6,12	3322	0,475
29	37,86	3,78	0,20	1,69	21,47	6,00	3270	0,467
30	37,30	3,72	0,19	1,67	21,17	5,95	3211	0,459
31	36,82	3,66	0,18	1,64	20,83	5,86	3160	0,451
32	36,24	3,61	0,19	1,62	20,54	5,78	3083	0,444
33	35,72	3,58	0,18	1,60	20,22	5,70	3055	0,434
34	35,23	3,50	0,18	1,57	19,92	5,60	2997	0,428
35	34,70	3,45	0,18	1,55	19,62	5,50	2944	0,420
36	34,16	3,40	0,18	1,52	19,30	5,44	2893	0,413
37	33,60	3,34	0,17	1,50	19,04	5,35	2831	0,404
38	33,05	3,29	0,17	1,47	18,74	5,27	2770	0,396
39	32,55	3,24	0,17	1,44	18,40	5,20	2726	0,389
40	32,00	3,18	0,17	1,43	18,12	5,10	2668	0,381
41	31,45	3,14	0,16	1,41	17,84	5,00	2614	0,373
42	30,96	3,08	0,16	1,38	17,52	4,90	2562	0,366
43	30,40	3,02	0,16	1,36	17,21	4,85	2504	0,358
44	29,84	2,98	0,16	1,33	16,93	4,76	2450	0,350
45	29,33	2,92	0,15	1,31	16,62	4,67	2396	0,342
46	28,81	2,86	0,15	1,29	16,30	4,59	2341	0,334
47	28,26	2,81	0,15	1,26	16,02	4,50	2286	0,327
48	27,72	2,76	0,14	1,24	15,72	4,42	2231	0,319
49	27,20	2,71	0,14	1,21	15,40	4,34	2179	0,311
50	26,65	2,66	0,14	1,19	15,11	4,25	2124	0,303

Торф содержит 70—75% летучих горючих веществ и является, как и дрова, длиннопламенным топливом.

По наличию запасов торфа и удобству его использования этот вид топлива в ряде районов (Ленинградская область, центральные районы СССР, Украина и др.) является наиболее надежной базой для дальнейшего развития керамической промышленности.

### 3. Каменный уголь

Каменный уголь является продуктом глубокого разложения древесины и наиболее компактным и транспортабельным видом твердого топлива. В этом отношении с каменным углем может конкурировать лишь жидкое топливо (нефть и мазут).

Таблица 22

#### КЛАССИФИКАЦИЯ УГЛЕЙ ДОНЕЦКОГО БАССЕЙНА

Марка	Обозначение марки	Содержание летучих веществ в горючей массе в %	Характеристика лабораторного коксового короляка	Теплотворная способность абсолютно сухого топлива, нормально рассчитанная в кал/кг	Размер кусков в мм
Длиннопламенный сухой . . . . .	Д	> 42	Неспекшийся, порошкообразный, или слипшийся	6700	—
газовый . . . . .	Г	35—44	Спекшийся, сплавленный, иногда вспученный (рыхлый)	7200	—
Паровичный жирный . . . . .	ПЖ	26—35	Спекшийся, сплавленный, плотный или умеренно-плотный	7450	—
коксовый . . . . .	К	18—26	Спекшийся, сплавленный, плотный или умеренно-плотный	7500	—
тощий . . . . .	Т	< 17	Неспекшийся, порошкообразный, или слипшийся	7900	—
Паровичный спекающийся	ПС	12—18	Спекшийся или сплавленный, от плотного до умеренно-плотного	7700	—
Антрацит					
плита . . . . .	АП	—	—	7800	> 100
крупный орех . . . . .	АКО	—	—	7700	100—25
мелкий орех . . . . .	АМ	—	—	7200	25—13
семячко . . . . .	АС	—	—	6850	13—6
зубок . . . . .	АЗ	—	—	6750	6—3
штыб . . . . .	АШ	—	—	6250	3—0
рядовой со штыбом . . . . .	АРШ	—	—	7100	100—0

По своим свойствам угли подразделяются на длиннопламенные и короткопламенные, жирные и тощие (сухие).

Кроме того, уголь различают по сортам, наиболее пригодным для тех или иных промышленных целей, например, уголь газовый, кузнечный, коксовый.

Для сжигания в топках камерных печей значительной емкости требуется уголь длиннопламенный, так как при обжиге на углях с коротким пламенем трудно выровнять температуру по всему сечению загрузки камеры.

При газификации углей в генераторах для обжига керамической продукции, требования к углю понижаются. Наилучшие результаты получаются при сжигании в топках керамических печей угля, имеющего большой выход летучих веществ.

В таблице 22 приведена характеристика донецких углей.

Как видно из этой таблицы, для непосредственного сжигания в топках керамических печей наибольшее применение могут иметь угли марки Д.

Химический состав донецких углей, в зависимости от сорта по классификации топливной подсекции Госплана, колеблется в следующих пределах: С от 76,5 до 97,5%, Н от 6,4 до 1,4%, О + N от 17,5 до 1%, N от 2,2 до 0. Содержание серы (горючей), обычно, не выходит из пределов 4,5—1,5% от горючей массы. Теплотворная способность горючей массы возрастает по мере увеличения содержания углерода.  $Q_{\text{H}}^{\text{гор}} = 6900 - 8620 \text{ кал}$ . Гигроскопичность каменных углей невысока,  $W_{\text{гигр}}$  достигает до 7%.

Второй бассейн с крупными залегами углей — Подмосковный — располагается на территориях Московской, Калининской, Воронежской и Курской областей.

Угли Подмосковного района (см. табл. 23 и 24) в основной массе — курные и резко отличаются от углей Донбасса высокой гигроскопичностью (порядка 30%) и высоким содержанием золы (от 12 до 25%). Содержание серы в них — в пределах 2—8%.

Таблица 23

СРЕДНИЙ СОСТАВ ОРГАНИЧЕСКОЙ МАССЫ И ТЕПЛОТВОРНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОДМОСКОВНЫХ УГЛЕЙ

Химический состав	Курные угли	Богхеды
С . . . . .	72—75%	76—80%
Н . . . . .	5—6%	7,8—9,2%
О + N . . . . .	20—22%	12,2—15%
Содержание летучих . . . . .	около 45%	до 80%
$Q_{\text{в}}^{\text{г}}$ . . . . .	6900—7100 кал	8100—8400 кал

По своим свойствам подмосковный уголь приближается к бурому. При хранении на поверхности он выветривается и рассыпается.

В небольших количествах добывается разновидность этого угля — богхед — длиннопламенный уголь, содержащий около 70% летучих веществ.

По составу горючей массы угли Подмосковного бассейна могли бы сжигаться непосредственно в керамических печах и дать достаточное для равномерного обжига развитие пламени. Однако, высокая

КЛАССИФИКАЦИЯ УГЛЕЙ ПОДМОСКОВНОГО БАССЕЙНА <sup>1</sup>

Марка	Обозначение марки	Размер кусков, в мм	Предельное содержание мелочи, в %	Влага в рабочем топливе, нормально рассчитанная, в %	Зола в абсолютно сухом топливе (бракеражный предел), в %	Теплотворная способность сухого топлива, нормально рассчитанная, в кал
Крупный . . . . .	К	> 50	10	33	26	5650
Орех . . . . .	О	50—20	15	33	33	4900
Мелочь и семячко . . . . .	МС	20—0	—	34	35	4600
Рядовой мелкий . . . . .	РМ	50—0	—	33	34	4750

зольность и влажность затрудняют получение необходимой температуры и регулировку обжига. Поэтому более целесообразно этот вид топлива газифицировать и, очистив таким образом от золы, влаги и серы, использовать с большим удобством и эффективностью.

Лучшие сорта длиннопламенных углей могут сжигаться в керамических печах с удовлетворительными результатами, однако, по длине пламени и равномерности обжига они не могут конкурировать с дровами и торфом. Некоторые сорта бурого угля с большим содержанием летучих веществ широко применяются в Германии для обжига разных керамических изделий. Уголь брикетируется или газифицируется.

Весьма крупное значение приобретают в СССР угли Урала и Сибири (см. табл. 25).

Таблица 25

ХАРАКТЕРИСТИКА УГЛЕЙ УРАЛА И СИБИРИ <sup>2</sup>

Месторождение	Зола в абсолютно сухом топливе (бракеражный предел), в %	Теплотворная способность сухого топлива, нормально рассчитанная, в кал
Анжерские копи . . . . .	13	7800
Кемеровские копи . . . . .	14	7400
Ленинские (Кольчугинские) копи . . . . .	13	7450
Прокопьевские и Кизеловские копи . . . . .	14	7400

Урал имеет угли всех классов. Наиболее богатое месторождение Сибири—Кузбасс—имеет колоссальные запасы спекающихся коксующихся углей. В Восточной Сибири у Иркутска имеется крупное месторождение угля—Черемховское.

Менее значительные, а в некоторых районах малоразведанные залегания углей разбросаны в разных местах Союза. При дальнейшем планомерном размещении керамических заводов (крупных потре-

<sup>1</sup> Техническая энциклопедия, т. 59, стр. 618.

<sup>2</sup> Техническая энциклопедия, т. 9, стр. 330.

бителей топлива) в разных областях Союза, каменный уголь займет значительное место в топливном балансе керамической промышленности.

В частности, для фарфоро-фаянсового производства можно применять угли или получаемый из них газ, которые по калорийности могут обеспечить заданную температуру в печной камере и дают длинное пламя с минимальным содержанием серы в продуктах горения. При содержании серы в каменных углях свыше 1% возникает опасность появления на черепке темных пятен, вследствие поглощения сернистой кислоты из печных газов свободными окислами ( $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ ), которые образуются в фарфоровых и фаянсовых массах при разложении карбонатов и дают с сернистой кислотой сульфаты. Наибольшее количество серы поглощается черепком в начальный период обжига при температуре ниже  $750^\circ\text{C}$ .

#### 4. Жидкое топливо

Благодаря высокой калорийности, удобству обслуживания и регулирования топочных устройств жидкое топливо является наиболее пригодным для использования в керамических печах и могло бы получить здесь весьма обширное применение, если бы этому не препятствовало большое потребление нефти на другие нужды.

В настоящее время в топках сжигается, главным образом, мазут. Повышение мирового спроса на легкое моторное топливо (бензин, лигроин) и смазочные масла вызвало изобретение крекинг-процесса для превращения мазута в более легкие фракции.

В СССР развитие автомобильного и авиационного транспорта и механизация сельского хозяйства вызывают усиленно растущий спрос на моторное топливо и смазочные масла, и потому сжигание мазута в пламенных печах со временем сохранится лишь в районах, бедных другими энергетическими ресурсами (каменным углем, дровами, торфом и гидроэлектрической энергией), в которых, по условиям транспорта, снабжение мазутом будет иметь исключительные преимущества.

Средний состав нефтяных остатков (мазута) следующий:  $\text{C}—86,0\%$ ;  $\text{H}—12,0\%$ ;  $\text{N}—0,05\%$ ;  $\text{O}—1,65\%$ ; золы, серы и влаги— $0,3\%$ ;  $Q_v—10\,520\text{ кал.}$ ;  $Q_n—9\,870\text{ кал.}$

Колебания состава нефтяных остатков и влияние их на теплотворную способность столь незначительны, что практически можно пользоваться средними данными, если мазут не имеет в больших количествах механических примесей, воды, грязи, а также свободных минеральных кислот и щелочей (применяемых при обработке нефти).

По техническим условиям содержание примесей не должно быть выше пределов, указанных в таблице 26.

При сжигании мазута наибольшее значение имеют вязкость и температура вспышки. Мазут с низкой температурой вспышки опасен в пожарном отношении, а весьма вязкий неудобно передавать по трубопроводам и распылять форсунками. Температура вспышки для мазута и смесей мазута с нефтью не должна быть ниже  $50—60^\circ\text{C}$ , а для применения на судах — ниже  $100^\circ\text{C}$ .

Вязкость не должна быть по вискозиметру Энглера ниже 7 при температуре  $50^\circ\text{C}$ . При низких температурах мазут застывает в вязкую нетекучую массу, в связи с чем зимой; при освобождении цистерн, его приходится предварительно разогреть паром до теку-

## ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ТОПЛИВНЫМ МАЗУТАМ В СССР

Сорта топливных мазутов	Температура воспламенения, в °С, не ниже	Вязкость при 50°С, в°Э не более	Температура застывания, по Гольде, в °С	Механические примеси, в %
Обыкновенный (А) . . . . .	50	7,5	Не выше — 5	} Не более 0,5
Парафинистый (Б) . . . . .	60	7,5	От — 5 до + 8	
Парафинистый (В) . . . . .	80	8,0	От + 8 до +24	
Парафинистый (Г) . . . . .	100	9,0	От +24 до +36	
Морской . . . . .	100	6,0	Не выше — 5	

чего состояния. Особенно легко застывают парафинистые мазуты например грозненский, для которого установлены пониженные требования. В зависимости от температуры застывания, мазуты подразделяются на 4 сорта (см. табл. 27).

Таблица 27

## ТЕМПЕРАТУРА ЗАСТЫВАНИЯ МАЗУТА

Сорта	Температура застывания мазута в °С			
	для грозненского		для остальных	
	от	до	от	до
А	ниже — 5		ниже — 10	
Б	— 5	+ 8	— 10	+ 8
В	+ 8	+ 24	+ 8	+ 24
Г	+ 24	+ 35	+ 24	+ 35

## 5. Естественный горючий газ

Горючие газы выделяются из естественных или специально устроенных скважин в районах залегания нефти. Особенно богаты природными газами США, где в штатах Пенсильвания, Оклахома, Луизиана и других они широко применяются и в качестве топлива в промышленных печах, в частности, для обжига керамических изделий в камерных и туннельных печах. Целый ряд керамических заводов (например, заводы Homer Loughlin в Newell, West Wirginia) работают на природном газе, средний состав которого колеблется в следующих пределах:  $\text{CH}_4$  60—90%;  $\text{C}_2\text{H}_6$  4—18%;  $\text{CO}_2$  0,10%;  $\text{CO}$  0,0—0,5%; тяжелых углеводородов 0,04%.

Бакинский естественный газ имеет следующий примерный состав:  $\text{CH}_4$ —92,49%,  $\text{C}_2\text{H}_6$ —4,11%,  $\text{H}_2$ —0,34%,  $\text{CO}_2$ —0,93%,  $\text{N}_2$ —2,13%.

Естественный газ является прекрасным высокосортным топливом, пригодным для разнообразного промышленного и бытового использования.

В США газовая сеть для эксплуатации естественных газов за последние годы расширилась свыше 100 000 км, причем широко применяется транспортирование газа по трубопроводам на отдаленное расстояние.

Отдельные газовые линии обслуживают весьма отдаленные от места добывания газа районы потребления, например, линия Панхендль-



Чикаго, протяжением 1600 км, и ряд других линий, протяжением от 340 до 450 км.

Добыча газа в 1928 г. в США достигла 46,5 млрд. м<sup>3</sup> или 60 млн. т условного топлива.

Потребление натурального газа в США распределяется по следующим основным группам: бытовое потребление — 20,5%, промышленное потребление — 74,5%, электростанции — 5%.

По своему составу, теплотворной способности, удобству сжигания и обслуживания печей естественный газ является идеальным топливом для керамического производства. В СССР имеется ряд месторождений, в настоящее время еще неиспользованных и мало разведанных, например, Ставропольское (Северный Кавказ), Урало-Эмбенское, в Керченском, Бердянском, Закаспийском, Ферганском и Ухтинском районах, на Северном Сахалине, в Прибайкалье и др. местах.

В СССР природные газы, выходящие на поверхность в 10 км от Дербента, имеют следующий состав (см. табл. 28).<sup>1</sup>

Рост добычи естественного газа в СССР приведен в таблице 29.<sup>2</sup>

Таблица 28

СОСТАВ ЕСТЕСТВЕННОГО ГАЗА

Составные части	Анализ 1918 г.	Анализ 1923 г.
СН <sub>4</sub> . . . . .	87,33 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	86,6 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
Тяжелые углеводороды . . . . .	—	1,7 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
СО <sub>2</sub> . . . . .	5,94 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	5,9 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
N <sub>2</sub> . . . . .	4,52 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	4,8 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
О <sub>2</sub> . . . . .	1,25 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	1,0 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
Теплотворная способность . . . . .	8209 кал	8860 кал

Таблица 29

ДОБЫЧА ЕСТЕСТВЕННОГО ГАЗА В СССР

Р а й о н ы	Добыча в м <sup>3</sup> по годам				
	1916	1923/24	1924/25	1925/26	1926/27
Бакинский . . . . .	84 000	26 800	87 200	156 200	166 200
Грозненский . . . . .	16 000	—	37 800	59 300	87 600
Дагестанские Огни . . . . .	—	—	—	11 000	—
Дергачевский . . . . .	5 600	—	2 700	1 000	—
Урало-Эмбенский . . . . .	—	—	—	300	1 050
Ставропольский . . . . .	5 300	—	—	—	—
Темрюкский . . . . .	400	—	—	—	—
Всего . . . . .	111 300	26 800	127 700	227 800	254 850

<sup>1</sup> А. И. Китайгородский; журнал „Керамика и стекло“, № 5, 1926.

<sup>2</sup> Техническая энциклопедия, т. 4, стр. 895.

## (Сортировка, сушка и газификация)

Керамические производства предъявляют к топливу, предназначенному для обжига изделий, большие требования. Оно должно обладать высокой температурой горения; горение должно легко поддаваться регулированию, допуская, в случае необходимости, быстрое форсирование (в печах периодического действия); пламя должно быть чистое, длинное, с минимальным содержанием в нем летучей золы и серы.

По мере роста потребления топлива, в керамической промышленности ощущается недостаток в таких первоклассных видах топлива, как сухие дрова, сухой малозольный торф, мазут, и предприятия вынуждены использовать низкосортное топливо, по преимуществу, местного значения. Иногда переход на другой сорт топлива, проведенный без достаточной подготовки, тяжело отражается на работе завода и качестве продукции.

Перспективы использования на керамических заводах топлива среднего и низкого сорта ставят во весь рост задачу его обогащения и усовершенствования техники сжигания.

Дрова и торф с большой влажностью не могут дать высоких температур горения и обеспечить нормальный режим обжига и потому совершенно неприемлемы в этой области.

В котельных и тому подобных установках, где температура поверхностей, воспринимающих тепло, невысока (порядка 150—300°С), температура пламени, получаемого даже при сжигании влажного топлива, достаточна для нормальной работы установки. Повышенная влажность топлива отражается в данном случае на увеличении его расхода обратно пропорционально снижению теплотворной способности  $Q_H^P$ . Работа установки, при наличии некоторого резерва мощности, может при этом не иметь существенных отклонений от потребной производительности.

Температура керамических изделий в конечной стадии столь высока (1200—1450°С), что температура горения влажного топлива не обеспечивает надлежащего перепада температур порядка 200—300°С, процесс обжига чрезвычайно замедляется и в производстве полукаются потери одновременно в четырех направлениях:

- 1) повышение часового расхода топлива, соответственно снижению теплотворной способности ( $Q_H$ );
- 2) увеличение расхода топлива, вследствие медленного повышения температуры и более продолжительного обжига;
- 3) нарушение режима обжига и снижение качества продукции (увеличение боя, брака и низких сортов);
- 4) снижение производительности печей (и предприятия в целом).

Приведенное сопоставление позволяет сделать вывод о большей выгодности использования хороших сортов топлива в керамических печах (и в особенности в горнах периодического действия), чем в котельных и других подобных установках, и о необходимости обогащения топлива, если керамический завод никак не может быть обеспечен топливом высокого качества.

В технике известно несколько способов обработки топлива (обогащения) в целях получения более высокого эффекта при его сжигании.

Все приемы обогащения имеют основной целью освобождение

от баласта — золы и влаги — и перевод топлива в состояние, обеспечивающее быстрое и правильное его сгорание в топках.

Для удаления излишней влаги из дров, торфа и бурых углей пользуются естественной и искусственной сушкой. Естественная сушка проще и дешевле искусственной, но ограничена гигроскопичностью топлива при хранении на воздухе (отсюда термин — воздушно-сухое топливо). При обжиге до температур в 1300—1400° С, обычно, пользуются воздушно-сухими дровами и торфом, однако, не исключается возможность выгодного применения искусственно высушенных дров, хотя бы в периодических печах в конечной стадии обжига.

Бурые угли после сушки рассыпаются и сжигаются за границей в фарфоровых горнах в виде брикетов, допускающих более удобное обслуживание топок. Частичное удаление золы (землистые породы) возможно лишь из каменных углей; осуществляется оно путем отсеивания и промывки.

Наиболее выгодное использование топлива представляет в современных условиях крупнейшую проблему.

Для иллюстрации разных методов использования топлива приводится общая схема использования ископаемых углей (см. стр. 76),

При разных методах первичной обработки и облагораживания топлива получается ряд продуктов, являющихся удобным топливом для печей керамических производств.

Обогащенный уголь, брикеты, пылевидное топливо, генераторный и коксовый газ находят широкое применение как теплотехническое топливо заводов.

Изменение структуры топлива — величины кусков, полен — не меняет его состава. Однако, при такой обработке топлива также получается более высокий эффект от его сжигания, и потому сортировка топлива по кускам (каменный уголь, торф) с отсевом мелочи, раскальвание дров на мелкие поленья и размол угля в пыль также могут быть отнесены к процессам обогащения топлива. Практикой установлены для каждого типа топок и сорта топлива оптимальные толщины слоя и величины кусков.

Иногда достаточно ввести в норму эти элементы топливосжигания, и тепловая установка начинает работать с улучшенным коэффициентом полезного действия.

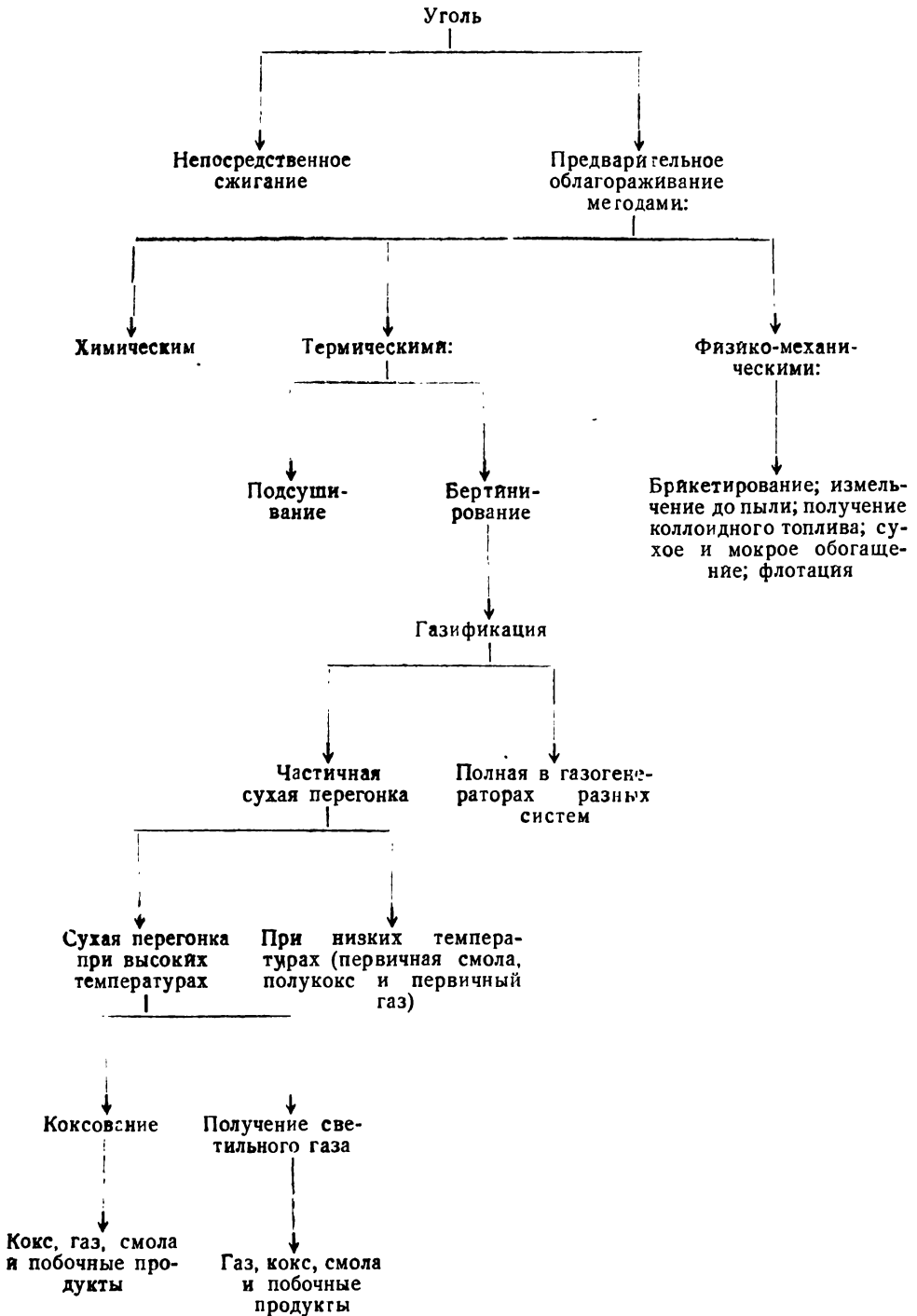
Превращение угля в пыль дает идеальные условия для смешения угольных частиц с воздухом и полного их сгорания. Сжигание угольной и торфяной мелочи в специальных топках и в менее ответственных установках гораздо выгоднее, чем в обжигательных керамических печах на обыкновенных решетках, рассчитанных для более крупных кусков топлива.

Выбор топлива и способов его наиболее рационального использования представляет для каждого завода серьезную техно-экономическую проблему и потому заслуживает особо тщательной и всесторонней проработки.

Из приведенных в схеме методов использования топлива газификация получила наибольшее применение на керамических заводах.

Путем газификации, для обжига фарфора и фаянса можно использовать топливо, непригодное для этих целей в твердом виде. При газификации, попутно, рационально разрешаются вопросы транспортирования топлива к топкам и регулирования обжига.

ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ



### III. Некоторые положения и расчеты из теории горения и газификации

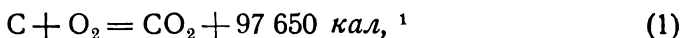
При большом разнообразии тепловых установок процессы сжигания в них топлива имеют много общего и протекают на основе установившихся и многократно проверенных закономерностей, изучение которых позволяет ориентироваться в процессе обжига и дает опорные точки для проектирования и расчета печей.

Горение твердого и жидкого топлива сопровождается реакциями его разложения на простейшие элементы и промежуточные соединения. При теплотехнических подсчетах конечного эффекта горения и установлении желательных условий для сжигания или газификации топлива приходится руководствоваться его элементарным составом, оставляя в стороне довольно сложный химизм промежуточных превращений.

Основными элементами разных видов промышленного топлива являются:

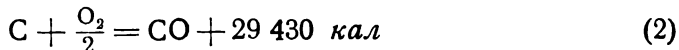
Углерод С с молекулярным весом (округленно) . . . . .	12
Водород Н <sub>2</sub> с молекулярным весом . . . . .	2
Азот N <sub>2</sub> с молекулярным весом . . . . .	28
Кислород O <sub>2</sub> с молекулярным весом . . . . .	32
Сера S с молекулярным весом . . . . .	32
и простейшие соединения:	
Окись углерода СО с молекулярным весом . . . . .	28
Метан СН <sub>4</sub> с молекулярным весом . . . . .	16
Серный колчедан FeS <sub>2</sub> с молекулярным весом . . . . .	120

Углерод сгорает при достаточных количествах кислорода и высокой температуре очага горения по следующей реакции:



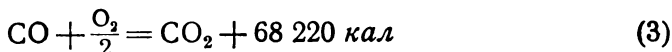
т. е. 12 кг углерода, соединяясь с 32 кг кислорода, дают 44 кг углекислоты с выделением 97 650 больших калорий, или: 1 молекула углерода, соединяясь с 1 молекулярным объемом кислорода, дает 1 молекулярный объем углекислого газа.

При недостатке кислорода (толстый слой топлива, недостаточная тяга) горение углерода протекает по реакции:



т. е. 1 молекулярный объем углерода (12), соединяясь с половиной молекулярного объема кислорода (32/2), дает 1 молекулу (28) окиси углерода. Здесь объем продуктов горения в два раза больше объема реагировавших элементов (пренебрегая незначительным объемом твердого углерода).

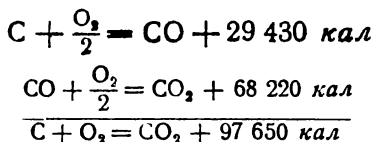
Окись углерода сгорает по реакции:



В этой реакции объем продуктов горения в два раза меньше объема элементов до реакции.

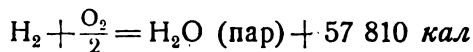
<sup>1</sup> Реакции горения приведены по проф. М. А. Павлову. Более новую сводку теплоты реакций горения, с незначительными отступлениями от нижеприведенных, дали: G. A. Goodenough and I. F. Felbeck. An Investigation of the Maximum Temperatures... University of Illinois Bulletin, XXI, № 29, 1924.

Сложением реакций (2) и (3) получаем реакцию полного горения [уравнение (1)]:

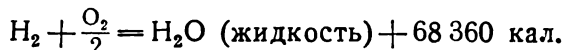


Горение углерода в один или два приема дает аналогичный результат: 1 молекулярный объем углекислоты и 97 650 кал тепла.

Горение водорода:



или



В последней формуле учтена выделяющаяся при конденсации воды скрытая теплота испарения: 586 кал на 1 г при 18° С или 586 × 18 = 10 550 на 1 граммоллекулу.

Горение метана:

$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O (пары)} + 192\,400 \text{ кал}$  без изменения объема газов.

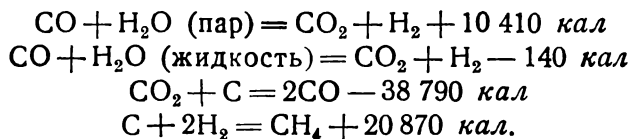
$\text{FeS}_2$  — серный колчедан (в углях) — сгорает и образует железистый силикат с  $\text{SiO}_2$  (золы) по следующей реакции:



Помимо реакции сгорания, в тепловых и газогенераторных установках часто протекают реакции диссоциации и обменного разложения, например:



1 молекула паров воды, взаимодействуя с 1 молекулой углерода, дает 1 молекулярный объем окиси углерода и 1 молекулярный объем водорода с поглощением 28 380 кал тепла.



### 1. Горение твердого топлива на колосниковой решетке

Сжигание топлива в простых топках проходит в три этапа. В соответствии с этим, при установившемся режиме горения процесс протекает в трех зонах:

1) в зоне горения раскаленного и обугленного топлива (кокс, древесный уголь);

2) в зоне выделения летучих продуктов сухой перегонки и наконец,

3) в зоне сгорания продуктов перегонки.

Устойчивое (регулярное) горение может происходить при непременно наличии очага горения в виде раскаленного слоя топлива в нижней зоне топки (кокс, древесный уголь, уголь).

Мелкое топливо, например, штыб, коксовые высевки и т. д. сжигать затруднительно, так как сохранить на решетках толстый слой раскаленного кокса не удается, маленькие куски раскаленного топлива быстро сгорают и, кроме того, легко проваливаются при чистке колосниковой решетки. Поэтому в условиях работы керамических печей, где требуются высокие температуры и регулярная работа топок по точному расписанию, сжигание мелкого топлива на колосниковых решетках до сих пор не давало хороших результатов.

Такие же препятствия мешают сжиганию в простых топках горючих сланцев, имеющих большое количество летучих продуктов, после выделения которых на решетке не остается кокса и нет, следовательно, очага горения.

Эти разновидности топлива могут, однако, с успехом сжигаться в пылевидных топках вращающихся и тому подобных печей.

При проектировании и эксплуатации печей часто приходится производить расчеты горения твердого топлива в простых топках. Главнейшими элементами таких расчетов являются:

1. Определение теплопроизводительности (калорийности) топлива.
2. Определение необходимого расхода воздуха — теоретического и с заданным коэффициентом избытка.
3. Определение количества продуктов горения для разных условий сжигания (теоретическое горение, неполное и с избытком воздуха).
4. Определение температуры горения топлива для разных условий сжигания.
5. Расчет потери тепла с отходящими газами при заданной их температуре.
6. Определение потери тепла при неполном сжигании топлива.
7. Установление материального баланса топки и основных ее проектных размеров.

Наибольший интерес в условиях керамических производств представляют расчеты горения дров и торфа в разных вариантах при переменной влажности и разных избытках воздуха.

Ниже будет приведено несколько примеров расчета, заимствованных из теплотехнической литературы, — классического труда проф. В. Е. Грум-Гржимайло и некоторых других работ.

## 2. Расчет горения дров

Схематический расчет горения дров приведен ниже для двух вариантов их влажности в 40% и в 18,7% (воздушно-сухих), что позволяет делать сопоставления и выводы о потерях тепла при использовании сырых дров.

а) Определение теплопроизводительности (калорийности)

Теплопроизводительность топлива измеряется в больших (кг) калориях и малых (г) калориях.

Большой калорией называется количество тепла, необходимое для нагревания 1 кг воды на 1°С; малой калорией — количество тепла, необходимое для нагрева 1 г воды на 1°С.

Так как теплоемкость воды меняется вместе с температурой, то различают калории, определяемые при нагреве воды от 0 до 1°С, от 0 до 15°С и от 0 до 100°С (нулевые калории, калории комнатной температуры и средние калории). Обычно, пользуются средней калорией (0—100°С). В немецкой литературе иногда можно встретить еди-

ницу теплоты — *hw*, равную 100 малым калориям, а в американской и английской технической литературе — „британскую единицу тепла“ — *Btu* (British thermal unit), равную 0,252 больших калорий.

При расчетах чаще всего пользуются теплотворной способностью, определенной лабораторным способом в калориметрической бомбе. Особо выделяются теплопроизводительность рабочего топлива — условно горючей части, органической массы.

Во избежание путаницы в символах, обозначающих разные понятия при исследованиях топлива и расчетах, приняты унифицированные обозначения, приводимые в таблице 30.<sup>1</sup>

Таблица 30

УНИФИКАЦИЯ СИМВОЛОВ ПРИ ЛАБОРАТОРНОМ ИСПЫТАНИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

№	Объект определения	Методы	Термины	Символы					
				лабора-торн.	раб. топливо	сухое топливо	усл. гор. масса	орган. масса	
Определение общего состава	1	Содержание негорючей части	Прокаливание до постоянного веса при 800° С	Зола	$A^L$	$A^P$	$A^C$	—	—
	2	Содержание негорючей части	Введение поправок на содержание карбонатов, сернистых соединений	Зола исправ.	$A^L_{и}$	$A^P_{и}$	$A^C_{и}$	—	—
	3	Влажность	Сушка при 105°С или в эксикаторе	Вода <sup>1</sup>	$W^L$	$W^P$ <sup>2</sup>	—	—	—
	4	Содержание летучих веществ: с влагой и без влаги	Унификацион. комис. (видоизменение американ.)	Летучие	$V^L$	$V^P$	$V^C$	$V^r$	$V^o$
	5	Содержание кокса с золой Содержание кокса без золы	По разности 100 — $V$ По разности 100 — ( $V + A$ )	Кокс	$K^L_a$ $K^L$	$K^P_a$ $K^P$	$K^C_a$ $K^C$	$K^r_a$ $K^r$	— —
Определение элементарного состава	6	Содержание углерода	По общим методам элемент. анализа	Углерод	$C^L$	$C^P$	$C^C$	$C^r$	$C^o$
	7	Содержание водорода		Водород	$H^L$	$H^P$	$H^C$	$H^r$	$H^o$
	8	Содержание азота	По Кьельдаю	Азот	$N^L$	$N^P$	$N^C$	$N^r$	$N^o$
	9	Содержание серы (общей)	По Эшка	Серa общая	$S^L_{об}$	$S^P_{об}$	$S^C_{об}$	—	—
	10	Содержание серы сульфатной	Метод не фиксирован	Серa сульфатная	$S^L_a$	$S^P_a$	$S^C_a$	—	—
	11	Содержание серы колчеданной	Метод не фиксирован	Серa колчеданная	$S^L_k$	$S^P_k$	$S^C_k$	$S^r_k$	—

<sup>1</sup> Техническая энциклопедия, т. 9, стр. 621—622.



№	Объект определения	Методы	Термины	Символы					
				лабора- торн.	раб. топливо	сухое топливо	усл. гор. масса	орган. масса	
Определение элементарного состава	12	Содержание серы органической	Метод не фиксирован	Сера органическая	$S_o^L$	$S_o^P$	$S_o^C$	$S_o^G$	—
	13	Содержание серы горючей	Суммирование серы колчеданной и органической	Сера горючая	$S_L^L$	$S_L^P$	$S_L^C$	$S_L^G$	—
	14	Содержание кислорода	По разности $100 - (W + A - R_3 + S_x)$	Кислород	$O^L$	$O^P$	$O^C$	$O^G$	$O^o$
	15	Теплотворная способность в кал/кг	В калориметрической бомбе с поправкой на радиацию и теплоту от запала	Теплотворная способность по бомбе	$Q_b^L$	$Q_b^P$	$Q_b^C$	$Q_b^G$	—
	16	Теплотворная способность в кал/кг	В калориметрической бомбе с поправками на теплоту образования серной и азотной кислот	Теплотворная способность (теплопроизводительность высшая)	$Q_v^L$	$Q_v^P$	$Q_v^C$	$Q_v^G$	—
17	Теплотворная способность в кал/кг	То же, считая воду в парах, т. е. скидывая $5,85 \times (9H + W)$	Теплотворная способность (теплопроизводительность низшая, полезная)	$Q_n^L$	$Q_n^P$	$Q_n^C$	$Q_n^G$	—	

- Примечания: 1. В соответствии с инструкциями, различают влагу внешнюю и влагу гигроскопическую.  
 2.  $W^P$  — получается отдельным определением.  
 3.  $R_3$  — алгебраическое увеличение веса золы при прокаливании (положительное или отрицательное).

Определение теплотворной способности топлива, на основании его анализа и данных о теплопроизводительности входящих в него элементов, можно производить, пользуясь специальными формулами.

Формула Дюлонга для низшей теплотворной способности топлива (с учетом уноса тепла водяными парами) имеет следующий вид:

$$Q_n = 81C + 342\left(H - \frac{O}{8}\right) + 25S - 6(9H + W).$$

Формула О-ва германских инженеров, являющаяся упрощением формулы Дюлонга, дает следующее выражение низшей теплотворной способности твердого топлива:

$$Q_n = 81C + 290\left(H - \frac{O}{8}\right) + 25S - 6W.$$

Д. И. Менделеев дал формулу, основанную на калориметрических определениях горения клетчатки, угля и нефти:

$$Q_p = 81C + 300H - 26(O - S).$$

Сопоставление формул Дюлонга, О-ва германских инженеров и Д. И. Менделеева с опытными определениями теплотворной способности показывает, что формула Дюлонга дает более точные результаты для топлива с содержанием летучих не выше 50%, т. е. пригодна только для каменных углей. Формула О-ва германских инженеров применима для топлива с выходом до 60—65% летучих, т. е. для каменного угля, бурого угля и торфа. Формула Д. И. Менделеева дает наиболее точные результаты при содержании летучих выше 50%, т. е. для бурого угля, торфа и дров.

Для определения расчетным путем теплотворной способности дров, необходимо иметь их состав при влажностях в 40 и 18,7%.

Состав органической массы и количество золы в дровах той и другой влажности колеблются в незначительных пределах и потому могут быть приняты неизменными. Соотношение элементов в составе сырых и воздушно-сухих дров определяется лишь различным содержанием воды баласта (табл. 31).

Таблица 31

СОСТАВ ДРОВ

Элементы	Сырые дрова	Сухие дрова	Сырые дрова	Сухие дрова
	в процентах		в молекулярных объемах	
C . . . . .	30,07	40,65	30,07 : 12 ≈ 2,50	40,65 : 12 = 3,388
H <sub>2</sub> . . . . .	3,42	4,63	3,42 : 2 ≈ 1,71	4,63 : 2 = 2,315
O <sub>2</sub> . . . . .	26,03	35,37	26,03 : 32 ≈ 0,82	35,37 : 32 = 1,105
N <sub>2</sub> . . . . .	0,18	0,24	0,18 : 28 ≈ 0,006	0,24 : 28 = 0,009
H <sub>2</sub> O . . . . .	40,00	18,70	40,00 : 18 ≈ 2,22	18,70 : 18 = 1,039
Зола . . . . .	0,30	0,41		

Руководствуясь приведенным анализом дров, определим, по формуле Менделеева, в виде примера, теплотворную их способность.

Дрова с 40% влажностью:

$$Q_p^p = 81C + 300H - 26(O - S) = 81 \times 30,07 + 300 \times 3,42 - 26 \times 26,03 = 2785 \text{ кал/кг.}$$

$$\text{Для воздушно-сухих } Q_p^p = 81 \times 40,65 + 300 \times 4,63 - 26 \times 35,37 = 3762 \text{ кал/кг.}$$

При определении низшей теплотворной способности рабочего топлива  $Q_n^p$ , необходимо учесть тепло при испарении воды гигроскопической и связанной в органической массе.

Теплота испарения воды принимается равной 10 550 кал на 1 молекулярный объем, что составляет около 600 кал на 1 кг воды.

Для сырых дров приведенного состава  $Q_n^p \approx 2361 \text{ кал/кг.}$

Для воздушно-сухих дров приведенного состава  $Q_n^p \approx 3419 \text{ кал/кг.}$

В практической работе часто дрова не взвешивают, а учитывают

по кубатуре, поэтому приводим таблицу, облегчающую расчеты при дровах разной влажности (табл. 32).<sup>1</sup>

Таблица 32

ХАРАКТЕРИСТИКА ДРОВ РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ

Влага W %	C <sub>p</sub> %	H <sub>p</sub> %	O <sub>p</sub> + N <sub>p</sub> %	Зола %	Q <sub>p</sub> кал/кг	Вес в кг/м <sup>3</sup>	Теплосодержание 1 м <sup>3</sup> в тыс. кал
0	49,4	6,2	43,3	1,10	4 400	315	1 386
5	46,8	5,9	41,25	1,05	4 150	331	1 375
10	44,4	5,61	39,0	0,99	3 900	350	1 365
15	41,94	5,29	36,82	0,95	3 650	371	1 355
20	39,5	4,98	34,64	0,88	3 400	394	1 340
21	39,0	4,92	34,21	0,87	3 350	399	1 337
22	38,48	4,86	33,8	0,86	3 300	404	1 334
23	38,0	4,8	33,35	0,85	3 250	409	1 330
24	37,5	4,73	32,93	0,84	3 200	414	1 325
25	37,0	4,67	32,5	0,83	3 150	420	1 323
26	36,51	4,61	32,06	0,82	3 100	426	1 321
27	36,02	4,55	31,63	0,80	3 050	432	1 318
28	35,53	4,49	31,19	0,79	3 000	437	1 311
29	35,04	4,43	30,75	0,78	2 950	443	1 307
30	34,55	4,36	30,32	0,77	2 900	450	1 305
31	34,06	4,30	29,88	0,76	2 850	457	1 302
32	33,57	4,24	29,44	0,75	2 800	463	1 296
33	33,07	4,18	29,01	0,74	2 750	470	1 293
34	32,58	4,12	28,57	0,73	2 700	477	1 288
35	32,08	4,05	28,15	0,72	2 650	484	1 283
36	31,59	3,99	27,71	0,71	2 600	492	1 279
37	31,10	3,93	27,28	0,69	2 550	500	1 275
38	30,61	3,87	26,84	0,68	2 500	507	1 268
39	30,11	3,81	26,41	0,67	2 450	516	1 264
40	29,62	3,74	25,98	0,66	2 400	525	1 260
45	27,12	3,42	23,81	0,65	2 150	573	1 232
50	24,63	3,11	21,62	0,64	1 900	630	1 197

б) Определение теоретически-необходимого количества воздуха в м<sup>3</sup> для горения 1 кг дров

Для подсчета расхода воздуха по весовому составу топлива в процентах пользуются формулами:

$$G_{\tau} = \left( \frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} + 8 \frac{H}{100} - \frac{O}{100} \right) \cdot \frac{100}{23} = \frac{8}{3} \frac{C + 8H - O}{23} \text{ кг воздуха на 1 кг топлива.}$$

$$V_{\tau} = \frac{\frac{8}{3} C + 8H - O}{23 \cdot 1,293} = \frac{2,67C + 8H - O}{30} \text{ м}^3 \text{ воздуха на 1 кг топлива,}$$

где:  $\frac{8}{3}$  — коэффициент (по весу) расхода кислорода на сжигание C в CO<sub>2</sub>;

8 — то же при горении H<sub>2</sub> в H<sub>2</sub>O;

C, H и O — процентное содержание углерода, водорода и кислорода в топливе;

$\frac{100}{23}$  — отнош. веса воздуха к весу заключенного в нем кислорода;

1,293 — вес 1 м<sup>3</sup> воздуха при 0° C и 760 мм рт. ст.

<sup>1</sup> Заимствована из книги: П. С. Толкованов. Дрова и их сжигание. Госэнергоиздат. М.-Л., 1932.

Подсчет воздуха по процентному содержанию *C*, *H* и *O* в топливе дает для воздушно-сухих дров вышеприведенного состава:

$$V_{\tau} = \frac{2,67C + 8H - O}{30} = \frac{2,67 \times 40,65 + 8 \times 4,63 - 35,37}{30} = 3,67 \text{ м}^3.$$

Часто расход воздуха подсчитывается по молекулярному составу топлива, согласно которому для данного топлива также получается расход теоретически необходимого воздуха  $V_{\tau} = 3,67 \text{ м}^3$  на кг воздушно-сухих дров. Расход воздуха, вычисленный по молекулярным объемам, составит: для сухих дров — 16,386 м. о., а для сырых — 12,085 м. о.

в) Состав и количество продуктов горения 1 кг дров при горении с теоретическим количеством воздуха.

Определим состав дымовых газов в молекулярных объемах по приведенному выше анализу дров (см. табл. 31).

Таблица 33

КОЛИЧЕСТВО ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЪЕМАХ

Сырые дрова (40% вл.)	Воздушно-сухие дрова (18,7% вл.)
$\text{CO}_2$ (по реакции: $\text{C} + \text{O}_2$ ) = 2,500 м. о. $\text{H}_2\text{O}$ (по реакции: $\text{H}_2 + \frac{\text{O}_2}{2}$ и вода топл.) $1,71 + 2,22 = 3,930$ м. о. $\text{N}_2$ — 9,550 (из воздуха вместе с $\text{O}_2$ ) + 0,006 (из топлива) . . . . . = 9,556 м. о.	$\text{CO}_2$ (по реакции: $\text{C} + \text{O}_2$ ) = 3,388 м. о. $\text{H}_2\text{O}$ (по реакции: $\text{H}_2 + \frac{\text{O}_2}{2}$ и вода топл.) — 2,315 + + 1,039 = 3,354 м. о. $\text{N}_2$ — 12,945 (из воздуха вместе с $\text{O}_2$ ) + 0,009 (из топлива) . . . . . = 12,954 м. о.
Всего на 100 г топлива . 15,986 м. о. $15,986 \times 0,0224 \times 10 = 3,58 \text{ м}^3$ продуктов горения на 1 кг дров,	Всего на 100 г топлива . 19,696 м. о. $19,696 \times 0,0224 \times 10 = 4,41 \text{ м}^3$ продуктов горения на 1 кг дров,
где: $0,0224 \text{ м}^3$ — объем граммолекулы любого газа.	

Таблица 34

ВЕС 1 м<sup>3</sup> ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

Сырые дрова	Воздушно-сухие дрова
$\text{CO}_2$ . . . . . $2,500 \times 44 = 110,00 \text{ г}$ $\text{H}_2\text{O}$ . . . . . $3,930 \times 18 = 70,74 \text{ г}$ $\text{N}_2$ . . . . . $9,550 \times 28 = 267,57 \text{ г}$	$\text{CO}_2$ . . . . . $3,388 \times 44 = 149,072 \text{ г}$ $\text{H}_2\text{O}$ . . . . . $3,354 \times 18 = 60,372 \text{ г}$ $\text{N}_2$ . . . . . $12,954 \times 28 = 362,712 \text{ г}$
Всего продукты горения (100 г дров) весят . . . . . 448,31 г	Всего продукты горения (100 г дров) весят . . . . . 572,156 г
$\text{Вес } 1 \text{ м}^3 = \frac{459,04 \times 10}{3,58 \times 1000} = 1,252 \text{ кг},$	$\text{Вес } 1 \text{ м}^3 = \frac{572,156 \times 10}{4,41 \times 1000} = 1,297 \text{ кг},$
где: $\frac{10}{1000}$ — переводный множитель от 100 г топлива к 1 кг топлива; 3,58 (и 4,41) — объем продуктов горения с 1 кг топлива	

Полученные по расчету объемы продуктов горения сырых и воздушно-сухих дров 3,58 м³ и 4,41 м³ относятся к нормальным условиям — температуре 0°C и давлению 760 мм рт. ст.

Для получения объема газов при изменившейся температуре, что неизбежно при сжигании топлива, пользуются формулой:

$$V_t = V_0 \left( 1 + \frac{t}{273} \right),$$

где:  $V_t$  — объем газов при заданной температуре,

$V_0$  — объем газов при температуре 0°C,

$t$  — температура в °C.

г) Определение теоретической температуры горения при теоретическом расходе воздуха и с его избытком.

Тепло, выделяемое при горении топлива, поглощается выделяющимися при этом продуктами горения, а также избыточным воздухом, не участвующим в горении, и кладкой топки. Раскаленные дымовые газы (продукты горения плюс избыточный воздух и продукты разложения топлива при неполном горении) в качестве теплоносителя передаются в печную камеру для выполнения тепловых процессов. Установить путем расчета действительную температуру пламени при выходе его из топочной камеры не представляется возможным ввиду большой сложности процесса передачи тепла топочным стенкам.

Поэтому приходится ограничиваться определением теоретической температуры горения, без учета охлаждения пламени в разные периоды его образования. Для характеристики топлива с точки зрения максимально-возможного пирометрического эффекта от его сжигания, необходимо подсчитывать температуру горения с теоретическим количеством воздуха, при котором эта температура достигает верхнего предела.

Теплоемкость продуктов горения меняется с повышением температуры. Поэтому нельзя установить и теплоемкость, не зная конечной температуры нагрева, в то же время нельзя определять последнюю, не установив теплоемкости газов. Единственный путь для расчета — это предварительная наметка верхнего и нижнего пределов температуры с определением теплосодержания газов и последующей интерполяцией по разности. В таблице 35 приводятся данные о теплосодержании 1 граммолекулярного объема различных газов при разных температурах. Этими данными мы будем пользоваться при определении температуры горения.

Теоретическая температура горения выражается формулой:

$$t_{\text{теор}} = \frac{Q}{V_1 C_1 + V_2 C_2 + V_3 C_3 \dots},$$

где:

$Q$  — количество тепла, выделяющееся при горении,  
 $C_1, C_2, C_3$  и т. д. — теплоемкости продуктов горения,  
 $V_1, V_2, V_3$  и т. д. — соответствующие объемы продуктов горения (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и др.).

Для воздушно-сухих дров выше была определена теплотворная способность:

$$Q_d^p = 3419 \text{ кал/кг или } 342 \text{ кал/100 г.}$$

ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ 1 ГРАММОЛЕКУЛЯРНОГО ОБЪЕМА РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ (в больших калориях)

°С	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO, N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Воздух
100	0,693	0,673	0,810	0,810	1,038	0,677
200	1,395	1,355	1,630	1,893	2,196	1,363
300	2,106	2,046	2,461	2,926	3,474	2,059
400	2,826	2,746	3,305	4,009	4,872	2,763
500	3,555	3,455	4,162	5,139	6,390	3,476
600	4,293	4,173	5,036	6,311	8,028	4,198
700	5,040	4,900	5,928	7,519	9,786	4,929
800	5,796	5,636	6,842	8,759	11,664	5,670
900	6,561	6,381	7,781	10,027	13,662	6,419
1 000	7,335	7,135	8,750	11,317	15,780	7,177
1 100	8,118	7,898	9,753	12,625	18,018	7,944
1 200	8,910	8,670	10,795	13,945	20,376	8,720
1 300	9,711	9,451	11,881	15,275	—	9,506
1 400	10,521	10,241	13,019	16,607	—	10,300
1 500	11,340	11,040	14,212	17,938	—	11,103
1 600	12,168	11,848	15,470	19,269	—	11,915
1 700	13,005	12,665	16,801	20,640	—	12,736
1 800	13,851	13,491	18,209	22,014	—	13,567
1 900	14,706	14,326	19,707	23,391	—	14,406
2 000	15,570	15,170	21,300	24,770	—	15,254
2 100	16,443	16,023	22,999	26,147	—	16,111
2 200	17,325	16,885	24,816	27,526	—	16,977
2 300	18,216	17,756	26,756	28,902	—	17,853
2 400	19,116	18,636	28,836	30,276	—	18,737
2 500	20,025	19,625	31,062	31,650	—	19,630
2 600	29,949	20,423	33,436	33,033	—	20,532
2 700	21,870	21,330	36,018	34,385	—	21,443
2 800	22,806	22,246	38,752	35,770	—	22,364

Рассчитываем теплоемкость газов для температур 1900—2000°С, в интервале между которыми предполагается искомая теоретическая температура горения дров заданной теплотворной способности.

Продукты горения 100 г дров вышеприведенного молекулярного состава, нагретые до 1900°С, согласно таблице, содержат:

CO <sub>2</sub> . . . . .	3,388 × 23,391 =	79,249 кал
H <sub>2</sub> O . . . . .	3,354 × 19,707 =	66,097 "
N <sub>2</sub> . . . . .	12,954 × 14,326 =	185,579 "

Всего . . . . . 330,925 кал

Продукты горения, нагретые до 2000° С, содержат:

CO <sub>2</sub> . . . . .	3,388 × 24,770 =	83,921 кал
H <sub>2</sub> O . . . . .	3,354 × 21,300 =	71,440 "
N <sub>2</sub> . . . . .	12,954 × 15,170 =	196,512 "

Всего . . . . . 351,873 кал

Разность теплосодержания продуктов горения при 2000° и 1900°:

$$351,873 - 330,925 = 20,948 \text{ кал,}$$

а между действительным теплосодержанием 100 г топлива и продуктов горения при 1900°:

$$342 - 330,925 = 11,075 \text{ кал.}$$

Следовательно, теоретическая температура горения воздушно-сухих дров при теоретическом расходе воздуха выше 1900° С и равна:

$$1900 + \frac{100 \cdot 11,075}{20,948} = 1953^\circ \text{ С.}$$

Для сырых дров выше была определена теплотворная способность  $Q_p^R = 2361 \text{ кал/кг}$  или 236 кал на 100 г.

Продукты горения 100 г дров, нагретые до 1700° С, содержат тепла (по таблице):

CO <sub>2</sub> . . . . .	2,500 × 20,640 =	51,600 кал
H <sub>2</sub> O . . . . .	3,930 × 16,801 =	66,028 "
N <sub>2</sub> . . . . .	9,556 × 12,665 =	121,026 "

Всего . . . . . 238,654 кал

Следовательно, температура горения сырых дров при теоретическом количестве воздуха около 1700° С.

д) Расчет горения с избыточным количеством воздуха по заданной температуре

В керамических производствах часто встречается необходимость обогреть печную камеру дымовыми газами пониженной температуры, например, при прокурке изделий в начальный период обжига.

Предположим, что по заданному расписанию обжига в период прокурки на воздушно-сухих дровах заданного выше состава надо дать продукты горения с температурой 1000° С путем их разбавления избытком воздуха, подаваемого через топку; нужно определить количество избыточного воздуха в процентах от теоретически необходимого.

Продукты горения 100 г дров при температуре в 1000° С содержат тепла (теплосодержание по табл. 35):

CO <sub>2</sub> . . . . .	3,388 × 11,317 =	38,341 кал
H <sub>2</sub> O . . . . .	3,354 × 8,750 =	29,347 "
N <sub>2</sub> . . . . .	12,954 × 7,135 =	92,427 "

Всего . . . . . 160,115 кал

Тепло, выделяемое при горении 100 г сухих дров, 342 кал.  
 Теплосодержание продуктов горения, нагретых до 1000°С 160,115 кал.

Необходимо израсходовать на подогрев избытка воздуха до 1000°С избыточное тепло в количестве 181,885 кал.

При теплоемкости 1 граммолекулы воздуха при 1000°С, равной 7,177 кал, нужно ввести избыточного воздуха:

$$181,885 : 7,177 = 25,342 \text{ м. о.}$$

Избыток воздуха при теоретическом расходе на 100 г дров в 16,386 м. о. будет:

$$\frac{25,342 \times 100}{16,386} = 154\% \text{ теоретического количества воздуха.}$$

В практической работе по эксплуатации печей для определения избытка воздуха по анализу дымовых газов пользуются формулами.

В формулах приняты следующие обозначения:

$$\alpha — \text{избыток воздуха} = \frac{V_B}{V_T};$$

$V_B$  — воздух, введенный в топку;

$V_T$  — воздух, теоретически необходимый для полного горения топлива.

Определение избытка воздуха по данным анализа дымовых газов производится для полного горения по формуле:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{N_2}},$$

а для неполного горения по формуле:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \left( \frac{O_2 - \frac{CO}{2}}{N_2} \right)}.$$

$N_2, O_2, CO_2, CO$  — процентное (по объему) содержание соответствующих газов в продуктах горения.

### 3. Газификация твердого топлива

а) Разновидности и характеристика газообразного топлива

Использование газообразного топлива в промышленных и, в частности, в керамических печах имеет ряд преимуществ перед использованием твердого топлива. Важнейшим из этих преимуществ является удобство обслуживания и автоматического питания печей при газовой их отоплении.

Вблизи мест залегаания твердого и жидкого топлива встречаются выходы естественного газа, как правило, высококалорийного и пригодного для использования в керамических печах. Однако, количество природных газов и географическое их размещение не позволяют базировать на этом виде топлива более или менее значительную часть керамических предприятий, располагающихся по целому ряду техно-экономических предпосылок в разных точках СССР.



Поэтому актуальным вопросом эксплуатации теплового хозяйства керамических заводов является газификация твердого топлива. В таблице 36 приводится классификация технических (искусственных) газов (по данным д-ра инж. Тренклера).

Таблица 36

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ

Группа	Вид	Разновидность	Примечание
А. Богатые газы	а) Курные газы	—	} Получаются при сухой перегонке
	б) Коксовальные газы		
Б. Бедные газы	а) Воздушные газы	Коксовальные газы, светильные газы	} Получаются при газификации твердого топлива
	б) Полуغازы	Газ Сименса, доменный газ	
	в) Паровые газы	Газ Доусона, генераторный газ	
	г) Регенерационные газы	Газ Монда Колошниковые газы, газы известковых печей	
В. Полные газы	а) Водяные газы	—	}
	б) Двойные газы	—	
	в) Оксигазы	—	
Г. Масляные газы	а) Насыщенные газы	Пентайр-газ, беноид-газ	} Получаются при газификации жидкого топлива
	б) Карбо-газы		
	в) Жирные газы		
Д. Благородные газы	—	Карбюрированный водяной газ Масляный газ, газ из смоляного масла, газ блау Ацетилен	

Широкое применение в керамической промышленности имеет газообразное топливо группы Б, получаемое в результате газификации твердого топлива. Остальные разновидности либо имеют специальное значение, либо являются отходами других производств.

В процессе газификации твердого топлива попутно достигается его обогащение, т. е. отделение баласта — золы и воды, что позволяет сжигать в промышленных печах низкосортное топливо, использование которого в твердом виде было бы невозможным или крайне неэкономичным. Активным реагентом, переводящим твердое топливо в газообразное состояние, является, главным образом, кислород воздуха.

Для получения нормального хода газогенераторного процесса требуется достаточно толстый слой топлива (так как в противном случае получается, собственно, топка для сжигания топлива) и регулярный подвод воздуха, а иногда и водяных паров.

Независимо от конструкции газогенератора и свойств твердого топлива, процесс газификации протекает по схеме, изображенной на рис. 34.

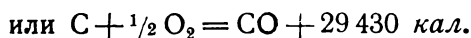
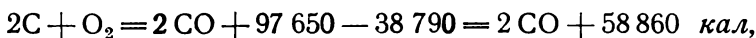
Продукты возгонки сухого топлива при температурах, господствующих в газогенераторной шахте, входят в виде газов и паров в состав получаемого генераторного газа.

Углерод топлива в нижних слоях сгорает в  $\text{CO}_2$  с выделением тепла  $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 97\,650 \text{ кал.}$

Выделяющееся тепло расходуется, в основном, на последующие эндотермические процессы восстановления  $\text{CO}_2$  в  $\text{CO}$ , сухую перегонку топлива и его подсушку. Получающийся углекислый газ, встречая в верхних слоях раскаленный слой кокса (углерода), реагирует с ним по формуле:



Суммируя два процесса, получаем в конечном счете:



Часть этого тепла теряется излучением и теплопередачей во внешнюю среду, а часть уносится с  $\text{CO}$  в верхнюю часть шахты и дальше через газопроводы. Большинство газогенераторных установок работает с последующей мокрой, сухой или комбинированной очисткой газа от пыли, воды, смол и других нежелательных примесей, при которой теряется физическая теплота газа. Поэтому получение горячего газа за пределами температуры, необходимой для нормального течения газогенераторного процесса, невыгодно.<sup>1</sup>

Исключение представляют газогенераторы, работающие с расплавлением золы, в которых температура в горне достигает значений  $1300 - 1500^\circ\text{C}$ , и необходима для регулярного хода газификации.

Оптимальная температура для отдельных зон газогенератора определяется из условий равновесия системы  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{C}$ .

Эта зависимость между температурой и течением процесса выражена в таблице 37.

С возрастанием температуры форсируется реакция  $\text{CO}_2$  с  $\text{C}$  и соответственно возрастает содержание  $\text{CO}$  в генераторном газе. При температуре в  $1000^\circ\text{C}$  в горне газогенератора  $\text{CO}_2$  почти полностью реагирует с раскаленным углеродом, и генераторный газ может практически почти не содержать  $\text{CO}_2$ , при условии продолжительного взаимодействия между  $\text{CO}_2$  и  $\text{C}$ .

Однако, при недостаточной продолжительности взаимодействия, что, обычно, наблюдается в производственных условиях работы газо-

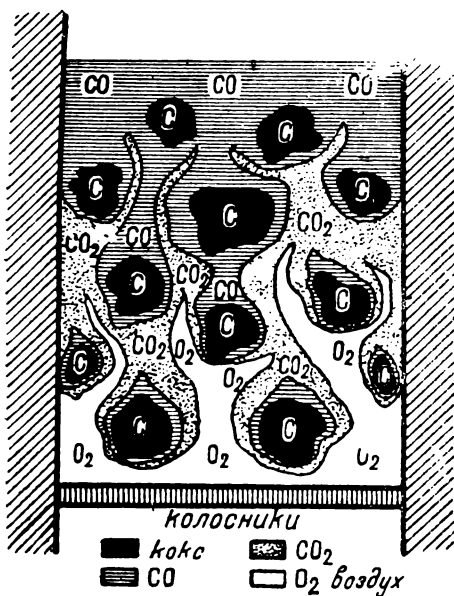


Рис. 34. Схема газогенераторного процесса

<sup>1</sup> Более подробно о газогенераторных процессах и газогенераторах см. В. Е. Грум-Гржимайло. Пламенные печи.

## ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ И ТЕЧЕНИЕМ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ

Температура в °С	Содержание СО	Содержание СО <sub>2</sub>
400	0,01	0,99
500	0,05	0,95
600	0,23	0,77
700	0,57	0,43
800	0,87	0,13
900	0,97	0,03
1000	0,99	0,01

генераторов, содержание СО в получаемом газе ниже, чем можно было ожидать на основании приведенной таблицы и замеров температуры.

Кроме того, на скорость газификации топлива влияют физические свойства топлива: пористость, каталитические свойства золы и др., что не дает возможности точно учесть количество и состав газа на основе одних лишь исследовательских работ. Однако, на основании этих работ, можно сделать вывод, что для увеличения и ускорения образования СО необходимо соблюдение трех условий:

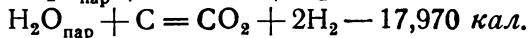
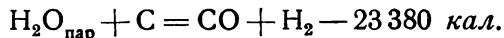
1) возможно бóльшая поверхность раскаленного топлива, омываемого газами;

2) возможно бóльшая продолжительность контакта между газом и топливом;

3) высокая температура в шахте газогенератора, порядка 1000° С.

Эти условия выполняются подбором размеров кусков топлива, увеличением высоты слоя топлива и быстрым ходом газификации, т. е. высокими скоростями газов в шахте.

Для снижения температуры в шахте генератора до оптимальной (1000° С), вместе с воздухом подаются пары воды, которые реагируют с раскаленным углеродом С; реакция сопровождается поглощением тепла и выделением СО, СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>:



Как показали исследования Клемента, Адамса и Хескинса, разложение паров воды по 1-й реакции с образованием Н<sub>2</sub> и СО получает наибольшее развитие при температурах 1200—1300° С.

Взаимодействие пара и раскаленного углерода в течение 11,05 сек. при температуре 1200° С дает следующий состав сухого газа: СО — 51,8%; Н<sub>2</sub> — 42,9%; СО<sub>2</sub> — 0,3%; СН<sub>4</sub> — 1,0%.

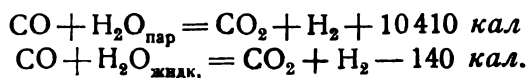
Условия равновесия этой реакции, по Ле-Шателье:

Температура в °С	Н <sub>2</sub> : Н <sub>2</sub> О
500	0,42
600	2,3
700	5,2
800	13,0
900	45,0
1000	103,0

При температурах 900—1000° С разложение пара в значительной части протекает по 2-й реакции с образованием Н<sub>2</sub> и СО<sub>2</sub>.

Анализ сухого газа, полученного воздействием пара на раскаленный кокс при температуре 1000° С в течение 6,98 сек., дает следующий состав: Н<sub>2</sub> — 49,3%; СО — 28,6%; СО<sub>2</sub> — 13,6%; СН<sub>4</sub> — 2,6%.

В верхней части шахты возможны еще реакции взаимодействия окиси углерода с водой:



Условия равновесия при этой реакции следующие:

Температура	Отношение $\frac{\text{CO} \times \text{H}_2\text{O}}{\text{CO}_2 \times \text{H}_2}$
500	0,25
600	0,41
700	0,59
800	0,88
900	1,20
1000	1,60

Подача паров воды в газогенераторную шахту в конечном счете дает в получаемом газе уменьшение содержания СО<sub>2</sub> и увеличение содержания Н<sub>2</sub> с одновременным понижением физической теплоты газа. Получение газа с высокой температурой целесообразно лишь при отсутствии его очистки и установке генераторов рядом с печью, в которой используется физическая теплота газа, а также в газовых топках.

Продукты газификации СО, Н<sub>2</sub>, СО<sub>2</sub> разбавляются азотом воздуха, поступающим в шахту вместе с кислородом, и потому калорийность генераторного газа, по сравнению с коксовальным, светильным или естественным, невысока. Более богатый (высококалорийный) газ получается при газификации топлива, содержащего „летучие вещества“ — тяжелые и легкие углеводороды, которые при нагревании топлива до температуры порядка 800° С выделяются, частично разлагаясь. Эти летучие вещества имеют различный состав в зависимости от состава топлива и температуры сухой перегонки.

При газификации топлива, содержащего летучие вещества, одновременно с вышеотмеченными процессами, протекающими в нижней части шахты газогенератора, происходит частичная сухая перегонка (дистилляция) топлива в верхней части шахты.

В зависимости от состава топлива, температуры и скорости нагревания, изменяется состав и выход продуктов сухой перегонки — газов, смолы и воды.

Для приближенной характеристики некоторых видов топлива в отношении содержания летучих веществ в таблице 38 приведены результаты их сухой перегонки при температуре 800° С.<sup>1</sup>

Учитывая высокую теплотворную способность газов сухой перегонки по сравнению с теплотворной способностью генераторного газа (около 1300—1500 кал/м<sup>3</sup>), получаемого при газификации твердого остатка (кокс, древесный уголь), в современных торфяных и дровяных газогенераторах устраивается высокая шахта (так называемая швельшахта) для сухой перегонки топлива до поступления в зону более высоких температур и полной газификации. Продукты сухой перегонки смешиваются с продуктами газификации углерода, повышая калорийность генераторного газа.

<sup>1</sup> Н. А. Костылев. Тепловые расчеты, теория газификации, газогенераторы. 1932.

	Битуминозный уголь <sup>1</sup>	Лягнит (бурый уголь)	Торф	Дерево
Летучие вещества в % веса . . . . .	31,7	50,8	67,9	71,2
Объем газа (0° С, 760 мм) м <sup>3</sup> /т . . . . .	203,7	377,2	394,8	222,3
CO <sub>2</sub> . . . . . %	3,2	21,5	21,0	22,3
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> . . . . .	2,9	1,0	0,6	1,4
O <sub>2</sub> . . . . .	1,3	0,7	0,4	0,5
CO . . . . .	8,0	18,5	26,2	20,4
H <sub>2</sub> . . . . .	39,8	32,2	33,6	32,8
CH <sub>4</sub> . . . . .	39,8	24,2	16,4	20,9
N <sub>2</sub> . . . . .	5,0	1,9	1,8	1,7
Теплотворная способность газа кал/м <sup>3</sup> . . . . .	5093,5	3284	3224	3460

При проектировании и эксплуатации газогенераторных установок часто приходится рассчитывать состав, объем и теплотворную способность генераторного газа по анализу газифицируемого топлива. Методика этих расчетов подробно разработана в специальных трудах, где приведены также примерные расчеты состава газа, теплотворной его способности, теоретические температуры и состав продуктов горения газа, получаемого из топлива заданного состава. <sup>2</sup>

В виде примеров, в труде проф. В. Е. Грум-Гржимайло „Пламенные печи“ приводятся расчеты генераторного газа, получаемого из влажных дров с осушкой газа.

При расчете генераторного дровяного газа принят следующий состав воздушно-сухих березовых дров (в процентах):

C . . . . .	37,30
H <sub>2</sub> . . . . .	4,54
O <sub>2</sub> . . . . .	34,62
N <sub>2</sub> . . . . .	0,23
H <sub>2</sub> O . . . . .	23,08
Зола . . . . .	0,23

---

100,00

Получаемый дровяной газ по расчету должен иметь следующую характеристику:

Состав газа (в %)

CH <sub>4</sub> . . . . .	1,89
CO <sub>2</sub> . . . . .	6,58
CO . . . . .	19,90
H <sub>2</sub> . . . . .	14,74
N <sub>2</sub> . . . . .	29,27
H <sub>2</sub> O . . . . .	27,62

---

100,00

Температура генераторного газа 230° С.

Расход первичного воздуха на 1 кг дров 0,907 м<sup>3</sup>.

Количество генераторного газа на 1 кг дров 2,453 м<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Битуминозные каменные угли (коксовые, кузнечные, газовые, сухие) по классификации, принятой XII геологическим конгрессом, содержат от 12 до 40% летучих веществ.

<sup>2</sup> В. Е. Грум-Гржимайло. Пламенные печи, т. I. — Н. А. Костылев. Тепловые расчеты, теория газификации, газогенераторы.

Расход вторичного воздуха для сжигания газа на 1 кг дров 2,46 м<sup>3</sup>.

Вес 1 м<sup>3</sup> генераторного газа 0,993 кг/м<sup>3</sup>.

Вес 1 м<sup>3</sup> продуктов горения 1,25 кг/м<sup>3</sup>.

Теплотворная способность 1 м<sup>3</sup> газа 1149 кал/м<sup>3</sup>.

Теоретическая температура горения влажного холодного газа при теоретическом расходе холодного воздуха 1614° С.

Температура горения влажного газа, нагретого до 230° С, при полуторном расходе воздуха, нагретого до 400° С, равняется 1606° С.

### б) Осушенный газ из сырых дров

Осушка генераторного газа охлаждением до 20° С дает следующие результаты:

#### 1. Состав осушенного генераторного газа (в %):

CH <sub>4</sub> . . . . .	2,55
CO <sub>2</sub> . . . . .	8,89
CO . . . . .	26,87
H <sub>2</sub> . . . . .	19,89
N <sub>2</sub> . . . . .	39,51
H <sub>2</sub> O . . . . .	2,29

100,00

2. Количество осушенного генераторного газа из 1 кг дров 1,818 м<sup>3</sup>.

3. Теплотворная способность 1 м<sup>3</sup> газа 1550 кал/м<sup>3</sup>.

4. Количество продуктов горения 3,858 м<sup>3</sup>.

5. Теоретическая температура горения при теоретическом расходе воздуха и холодном газе и воздухе 1871° С.

Теоретическая температура горения осушенного газа на 257° выше температуры горения влажного газа. Но при осушивании дровяного газа из него удаляются продукты сухой перегонки, из которых смола представляет большую пирометрическую ценность, и теряется

Таблица 39

### ПРИМЕРНЫЙ СОСТАВ И ТЕПЛОТВОРНАЯ СПОСОБНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Название газа	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Нижшая теплотворная способность в кал/м <sup>3</sup>	Выход газа из топлива в м <sup>3</sup>
Генераторный каменноугольный (воздушный) . . . . .	5,0	23,0	3,0	0,2	6,0	—	—	62,8	1 140	4 000
То же (смешанный, с вдуванием H <sub>2</sub> O) . . . . .	3,0	28,0	3,0	0,2	12,0	—	—	53,8	1 450	3 750
Генераторный торфяной (генератор с швельшахтой) . . . . .	7,3	28,0	2,8	—	17,4	0,3	—	44,2	1 450	1 800
Генераторный осушенный из дров w = 23% (по расчету) . . . . .	8,9	26,9	2,5	—	19,9	—	2,3	39,5	1 550	1 820
Колошниковый (доменной печи) . . . . .	10,0	27,4	0,9	—	3,3	—	—	58,4	950	4 570
Светильный (каменноугольный) . . . . .	2,0	8,0	32,0	4,0	51,0	—	—	3,0	5 000	340
Коксовальный . . . . .	3,7	5,6	40,8	5,8	37,6	0,4	—	6,1	4 200	320

часть его физической теплоты. Уменьшение физической теплоты газа для печей с отдаленно расположенными газогенераторами нельзя рассматривать как потерю. Смолы при осушке генераторного газа могут быть собраны и возвращены в генератор: опыты показывают, что они быстро стекают в зольник и разлагаются там на СО и Н<sub>2</sub>.

Таким образом, применение осушки дровяного газа должно быть признано рациональным.

В таблице 39 приводятся приближенные данные о составе, выходе и теплотворной способности искусственных газов, применяемых в качестве топлива для керамических печей.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

# УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В КЕРАМИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

### 1. Топки для твердого топлива

Несмотря на все возрастающее применение в керамических печах газообразного и жидкого топлива, топки для сжигания разных видов твердого топлива имеют до сих пор большое значение в керамическом производстве.

Из всех видов твердого топлива для керамической промышленности наиболее подходящими являются: дрова, торф, длинно-пламенный каменный уголь и бурый уголь (брикеты).

Топки, построенные для сжигания топлива в керамических печах, в силу специальных требований, предъявляемых к обжигу, не являются обособленными агрегатами и составляют одно целое с печной камерой. Процесс сжигания топлива, начинающийся в топке, обычно заканчивается в каналах, оставляемых между обжигаемыми полуфабрикатами. Несмотря на такое существенное отличие топок керамических печей от котельных и других топок, процессы горения топлива на колосниковой решетке протекают в них по аналогичной с другими топками схеме.

Почти все топки керамических печей, работающие на твердом топливе, пока не имеют автоматических устройств (стоккеров) для питания топливом и загружаются периодически вручную.

#### 1. Топки с колосниковой решеткой для сжигания дров

Топки для дров обычно имеют горизонтальную колосниковую решетку. Весьма часто (например, в фарфорообжигательных 2-этажных горнах) колосники решетки выполняются из шамотных брусьев. Изредка применяются полушахтные и пультовские топки без решеток, а также топки с наклонными колосниковыми решетками.

Горение дров на колосниковой решетке происходит в три фазы:

- 1) подсушка топлива;
- 2) возгонка и горение летучих веществ;
- 3) горение угля и выгорание его из очаговых остатков.

Первая и вторая фазы требуют для испарения влаги и возгонки топлива определенного расхода тепла, который покрывается за счет выделения тепла при горении отдельных элементов топлива. Эти фазы являются подготовительными.



С увеличением влажности топлива затягивается первая подготовительная фаза, поглощающая много тепла, и потому горение в этом случае протекает медленно и неустойчиво.

Вторая фаза—возгонка летучих веществ (углеводородов) и последующее их горение—начинается до окончания первой фазы и проходит за счет тепла сжигания, расположенного ниже древесного угля и летучих продуктов.

Горение летучих веществ возможно лишь при частичном прохождении кислорода через слой раскаленного угля, или же за счет вторичного воздуха, подаваемого по специальным каналам в топочную или обжигательную печную камеру.

При толстом слое и слабой тяге приток воздуха, сравнительно с количеством участвующего в реакциях твердого топлива, недоста-

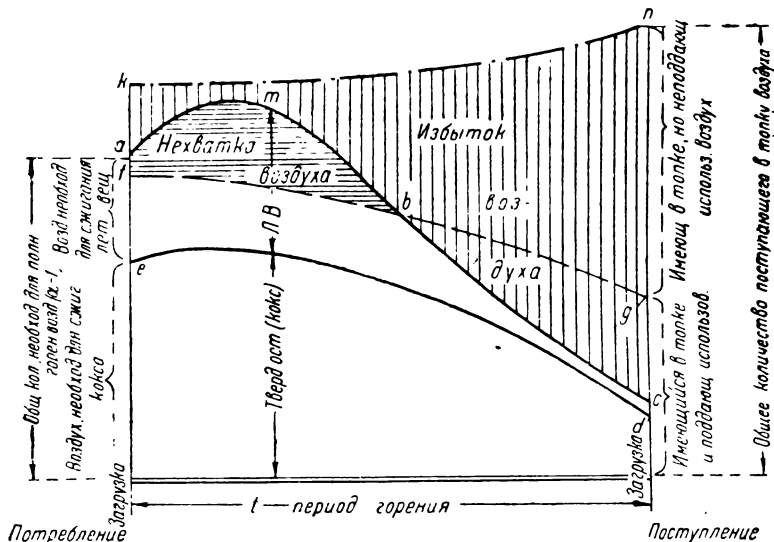


Рис. 35. Процесс горения в топке с периодической загрузкой

точен и потому имеет место генераторный или полугенераторный процесс, продукты которого могут сжигаться лишь за счет вторичного воздуха.

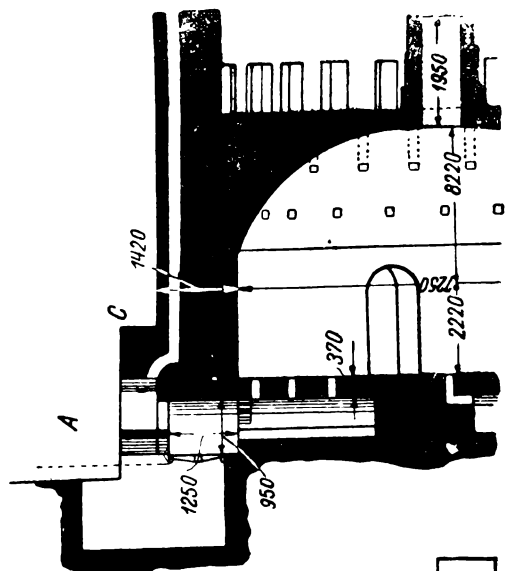
Третья фаза—горение древесного угля, остающегося после возгонки летучих веществ,—может также протекать при достаточном или недостаточном количестве притекающего воздуха, в зависимости от толщины и плотности слоя угля и разности давлений под решеткой и над слоем угля.

При достаточном притоке кислорода, углерод сгорает в  $\text{CO}_2$ . Наоборот, при недостатке кислорода получающийся углекислый газ, встречаясь с раскаленными слоями угля, восстанавливается до  $\text{CO}$  ( $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ ). Все три фазы горения частично совмещаются друг с другом: выделение летучих начинается до полного удаления влаги, а горение углерода—до выделения всех летучих веществ.<sup>1</sup>

При периодической загрузке топлива в разное время преобладает та или иная фаза горения. Чем больше степень неравномерности

<sup>1</sup> Подробное изложение процесса горения дров—см. К. В. Кириш. Дрова как топливо. М., 1919.

питания топки дровами, тем резче выступает преобладание отдельных фаз горения в период загрузки топлива и его прогорания. После загрузки дров в топку, выделяется большое количество летучих веществ и одновременно увеличивается толщина слоя топлива, затрудняющего приток воздуха в топку, что вызывает неполное сгорание летучих и окиси углерода в топочной камере. По мере прогорания топки, потребность в кислороде падает в соответствии с уменьшением массы горящего топлива, а приток воздуха, по мере уменьшения толщины слоя, не уменьшается, а, наоборот, увеличивается. Это, в конечном счете, приводит к избытку воздуха в продуктах горения и снижению их температуры.



Влияние периодической загрузки дров в топку наглядно показано на рис. 35.

Режим работы керамических печей периодического действия резко меняется в различные периоды обжига в зависимости от ряда технологических требований. В начальный период нагрева (прокурка), когда керамические изделия с толстым черепком (кирпич, массивные фарфоровые изоляторы и т. п.) освобождаются от остатков гигроскопической влаги, необходимо подавать из топок в печную камеру газы с невысокой температурой, что достигается работой топок с большим избытком воздуха при тонком слое топлива, т. е. на прогар.

В конечные периоды обжига, когда для достижения высоких температур необходимо работать с расходом воздуха, близким к теоретическому, в топках поддерживают толстый слой топлива, дающий неполное сгорание в топке и нейтральную

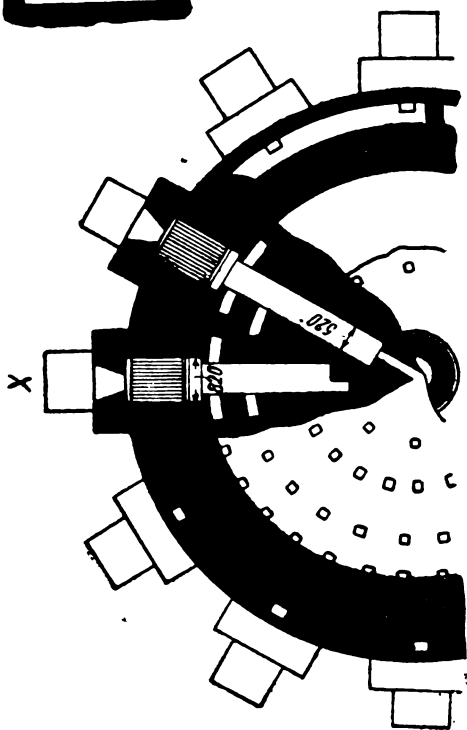


Рис. 36. Дровяная топка фарфорового горна с прямым пламенем

или восстановительную атмосферу в печной камере. Среднее напряжение колосниковой решетки в топках фарфоровых горнов колеблется в пределах 225—300 кг/м<sup>2</sup> в час, а отношение максимального напряжения к среднему находится, обычно, в пределах 1,13—1,25. Кроме того, топка

должна работать с высоким коэффициентом полезного действия, т. е. возможно меньше отнимать тепла на нагрев стен и свода и в то же время не давать у топочных вылетов языков пламени с высокими температурами, во избежание пережога ближайших рядов продукции и быстрого разрушения смежной огнеупорной кладки.

В целях более равномерного нагрева обжигаемых изделий, необходимо, по возможности, перенести догорание продуктов возгонки и окиси углерода в печную камеру и, тем самым, обеспечить наи-

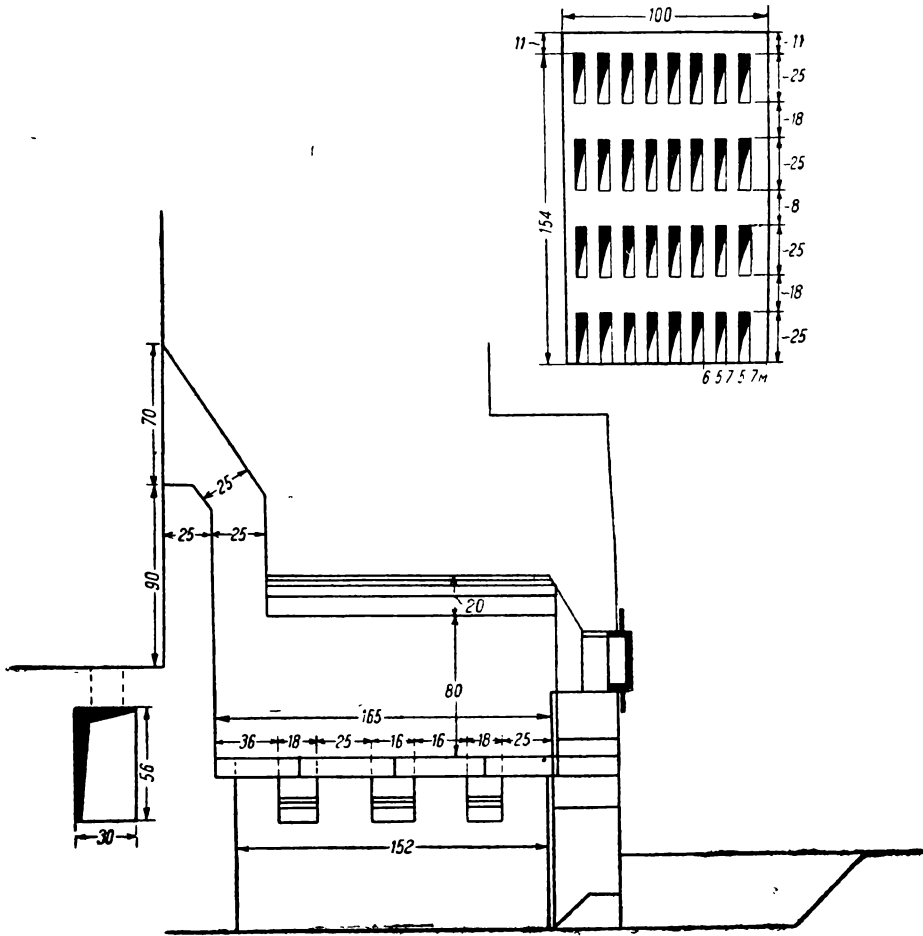


Рис. 37. Дровяная топка фарфорового горна с обратным пламенем

более равномерные температуры циркулирующих газов по всем ее сечениям. Это требование к работе керамической печи сводит роль топки в основной части обжига к подготовке топлива, превращению его в газообразное состояние и лишь к частичному сжиганию в топке получающихся газообразных продуктов, что в свою очередь приводит к высокому напряжению топочных объемов в эксплуатации.

На рис. 36 и 37 показаны дровяные топки таких печей, как фарфоровые и фаянсовые горны.

## 2. Топки с колосниковыми решетками для сжигания кускового торфа

Процесс горения торфа, в основном, весьма сходен с горением дров и протекает в три фазы: подсушивание торфа, возгонка летучих веществ и горение кокса. Процесс выжигания остатков кокса из шлаков выделяют иногда в четвертую фазу.

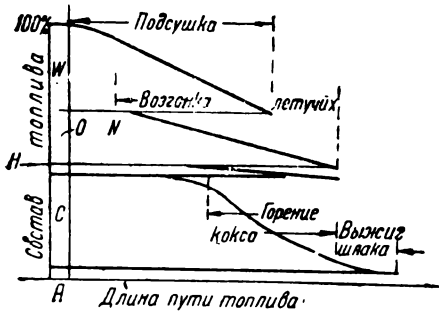


Рис. 38. Схема процесса горения торфа

Большой выход летучих веществ, часто встречающаяся повышенная влажность торфа и малая его теплопроводность замедляют прохождение двух первых фаз горения, перекрывающих частично или полностью третью фазу — горение торфяного кокса (см. диаграмму<sup>1</sup> на рис. 38).

Специфические особенности дровяных топок, устроенных в периодических печах для обжига керамической продукции, имеются и в топках для сжигания кускового торфа.

Среднее напряжение колосниковой решетки в торфяных топках фарфоровых горнов колеблется около  $250 \text{ кг/м}^2$  в час. Отношение максимального напряжения в среднем — около 1,20.

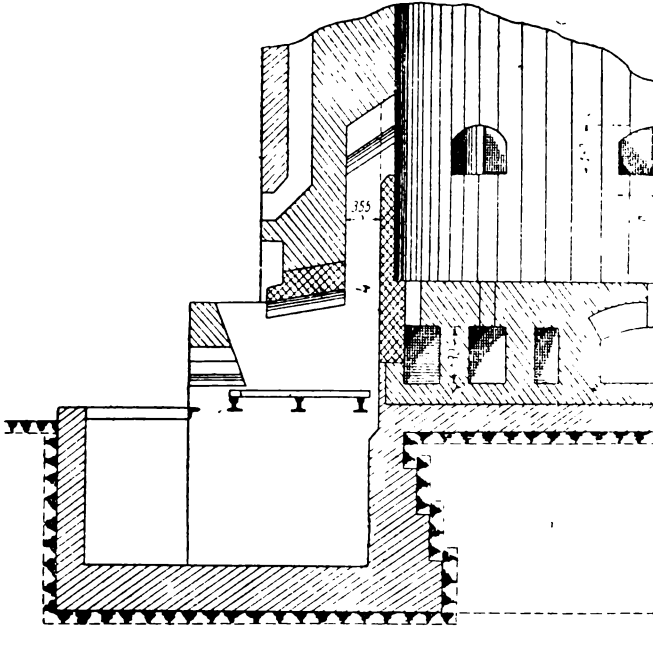


Рис. 39. Торфяная топка фарфорового горна с обратным пламенем

Торфяные топки в керамических печах у нас в стране постепенно вытесняют топки для сжигания дров, что обычно не требует крупных переделок в печах и легко осваивается обслуживающим

<sup>1</sup> Г. Ф. Кнорре. Курс топочных процессов. Энергоиздат, 1933.

персоналом (горновщиками и обжигальщиками). На рис. 39 показана топка фарфорового горна, работающего на торфе.

Регулирование работы торфяных топок для получения равномерного прогрева, загрузки печной камеры и желательной кривой обжига достигается такими же приемами, как и при обжиге на дровах. Некоторое отличие торфяных топок от топок, работающих на дровах, заключается в необходимости более частой очистки колосниковой решетки от шлаков.

Топки для сжигания каменного и бурого угля не получили значительного распространения в керамической промышленности СССР. Заводы, работающие по экономическим соображениям на каменном угле, используют последний путем предварительной его газификации. Непосредственное сжигание кускового угля целесообразно в топках керамических печей лишь при наличии марок, дающих длинное пламя и содержащих незначительные количества серы.

Переходным этапом к газовому отоплению керамических печей являются полугазовые топки.

### 3. Полугазовые топки

Работа топки с колосниковой решеткой в фарфоровом горне в наиболее ответственной части обжига отличается тем, что процесс горения не заканчивается в пределах топочной камеры. Догорание топочных газов внутри печной камеры является одним из важнейших требований, предъявляемых к керамическим печам и потому степень недожога газов в топочной камере поддерживается на высоком уровне.

В период „большого огня“ топка при форсированной работе дает, по существу, смесь газов, состоящую из продуктов горения с законченными реакциями, некоторого количества воздуха, неиспользованного в самой топке, и горючих продуктов возгонки и неполного сгорания: CO, H, CH<sub>4</sub> и др. Приток воздуха и его пропорционирование в соответствии с количеством топлива и его подготовленностью на разных участках решетки не поддается жесткому регулированию ввиду переменного режима топки при периодической его загрузке. Поэтому распределение процесса горения между топочной камерой и печной на две стадии протекает неорганизованно и не подчиняется регулированию.

Стремление отрегулировать работу топки таким образом, чтобы *определенная часть* топлива сжигалась в топочной камере, а остальная в виде генераторного газа в смеси с полученными продуктами горения поступала в печную камеру и сжигалась за счет точно регулируемого вторичного (дополнительного) воздуха, — нашло свое выражение в разработке конструкции полугазовых топок. Полугазовые топки были конструктивно разработаны для разных видов топлива проф. В. Е. Грум-Гржимайло. Полугазовые топки могут быть приспособлены к сжиганию всех видов топлива, пригодного для газификации.

В смысле структуры (величина кусков), в полугазовых топках может использоваться более разнообразное топливо, чем в газогенераторах.

В зависимости от размеров шахты полугазовой топки (рис. 40), в ней устанавливается и автоматически поддерживается желательная высота слоя топлива, чем, в свою очередь, определяется состав и температура получаемого полугаза.

Полугазовыми топками для сжигания дров и торфа оборудован ряд керамических печей как непрерывного, так и периодического действия, например, туннельная печь для обжига фаянса на Калининской фабрике, круглые горны на Песоченской фабрике, муфельные непрерывнодействующие печи для закрепления красок на многих фарфоровых заводах, а также целый ряд печей самого разнообразного назначения в других отраслях керамической промышленности.

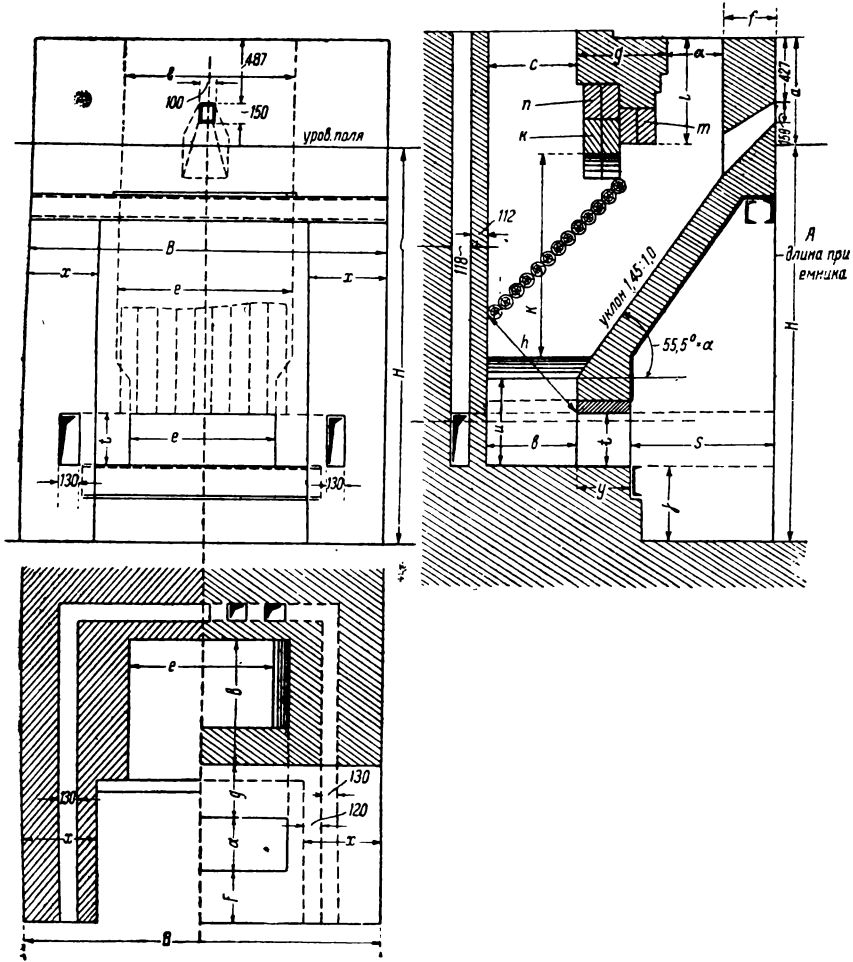


Рис. 40. Типовая полугазовая топка (см. таблицу на стр. 103)

На рис. 41 показана одна из топок фарфорового горна № 2 Дулевского завода. Как видно из чертежа, топка, в основном, состоит из двух шахт: вертикальной — для сжигания и газификации топлива и наклонной — для загрузки. Наклон плоскости, по которой топливо сползает в вертикальную шахту, должен быть достаточно крутым. В первом варианте — наклон 45°, который оказался недостаточным для регулярного питания вертикальной шахты самотеком: приходилось через гляделку периодически проталкивать дрова ломом. После увеличения наклона до 55°, обслуживание топки сразу облегчилось.

Размеры, зафиксированные для всех топок в мм

<i>a</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>u</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>A</i> <sub>min</sub>	Угол $\alpha$
710	360	350	580	730	490	940	350	560	500	350	2 500	55,5°

Тип топки	Пояс горения			Толщина слоя топлива <i>п</i> , мм	Длина зольника <i>ε</i> , мм	Объем, занимаемый топливом <i>м</i> <sup>3</sup>	Часовой расход топлива при напряжении		Запас топлива в топке при напряжении		Глубина подвала <i>Н</i> , мм	Глубина топки <i>К</i> , мм	Средняя для судов <i>К</i> и <i>п</i> , мм	
	ширина <i>b</i> , мм	длина <i>l</i> , мм	площадь $b \times l$ , мм <sup>2</sup>				300 кг/м <sup>2</sup>	500 кг/м <sup>2</sup>	300 кг/м <sup>2</sup> в часах	500 кг/м <sup>2</sup> в часах				
Длина полена 1 000 мм	1	600	1 180	0,71	1 200	950	2,30	220	350	4,3	2,6	3 000	1 860	165
	2	600	1 180	0,71	900	950	1,67	220	350	3,1	1,9	2 600	1 460	165
	3	480	1 180	0,57	1 250	950	2,18	170	280	4,0	3,0	3 000	1 860	165
	4	480	1 180	0,57	900	950	1,60	170	280	3,8	2,25	2 600	1 460	165
	5	360	1 180	0,423	1 300	950	1,96	130	210	6,0	3,70	3 000	1 860	165
	6	360	1 180	0,423	950	950	1,58	130	210	4,9	3,00	2 600	1 460	165
Длина полена 750 мм	7	600	840	0,50	1 200	610	1,72	150	250	4,6	2,75	3 000	1 860	115
	8	600	840	0,50	900	610	1,18	150	250	3,75	1,90	2 600	1 460	115
	9	480	840	0,40	1 250	610	1,63	120	200	5,40	3,25	3 000	1 860	115
	10	480	840	0,40	900	610	1,13	120	200	3,75	2,25	2 600	1 460	115
	11	360	840	0,30	1 300	610	1,53	90	150	7,00	4,20	3 000	1 860	115
	12	360	840	0,30	950	610	1,07	90	150	4,80	2,90	2 600	1 460	115

Толщина слоя топлива при указанных размерах топки поддерживается около 1 м. Ширина рабочей и загрузочной шахт определяется потребной производительностью топки, а при дровах — и длиной поленьев. Работа топки протекает нормально при длине полена, соответствующей длине топки, так как при коротких поленьях правильное их скатывание нарушается и в шахте получается беспорядочный костер, приводящий к отклонениям от нормального полугенераторного процесса и проектной производительности топки.

Вторичный воздух для сжигания полугаза в печной камере непрерывно действующих керамических печей, например туннельных, подается из зоны охлаждения, а в периодических — из атмосферы через каналы, расположенные в задней стенке топочной шахты. В последнем случае воздух слегка подогревается (до 60—100°) за счет тепла, передаваемого через стенку из топочной шахты. Смещение полугаза с вторичным воздухом производится либо перед входом в печную камеру путем устройства разветвленных каналов для полугаза и вторичного воздуха, обеспечивающих образование вихрей и быстрое развитие процесса догорания полугаза с получением высоких температур, или же в самой печной камере. Для перемещения процесса горения в печную камеру, подвод полугаза и вторичного воздуха осуществляется через каналы, что не допускает тесного перемешивания полугаза и воздуха до вступления в камеру. Это дает возможность сделать процесс горения более длительным и получить соответственно удлиненный факел пламени. Распределение полугаза с интенсивным перемешиванием имеет место в конструкции выходных каналов, разработанных для „скороспелок“ (муфельных непрерывных печей).

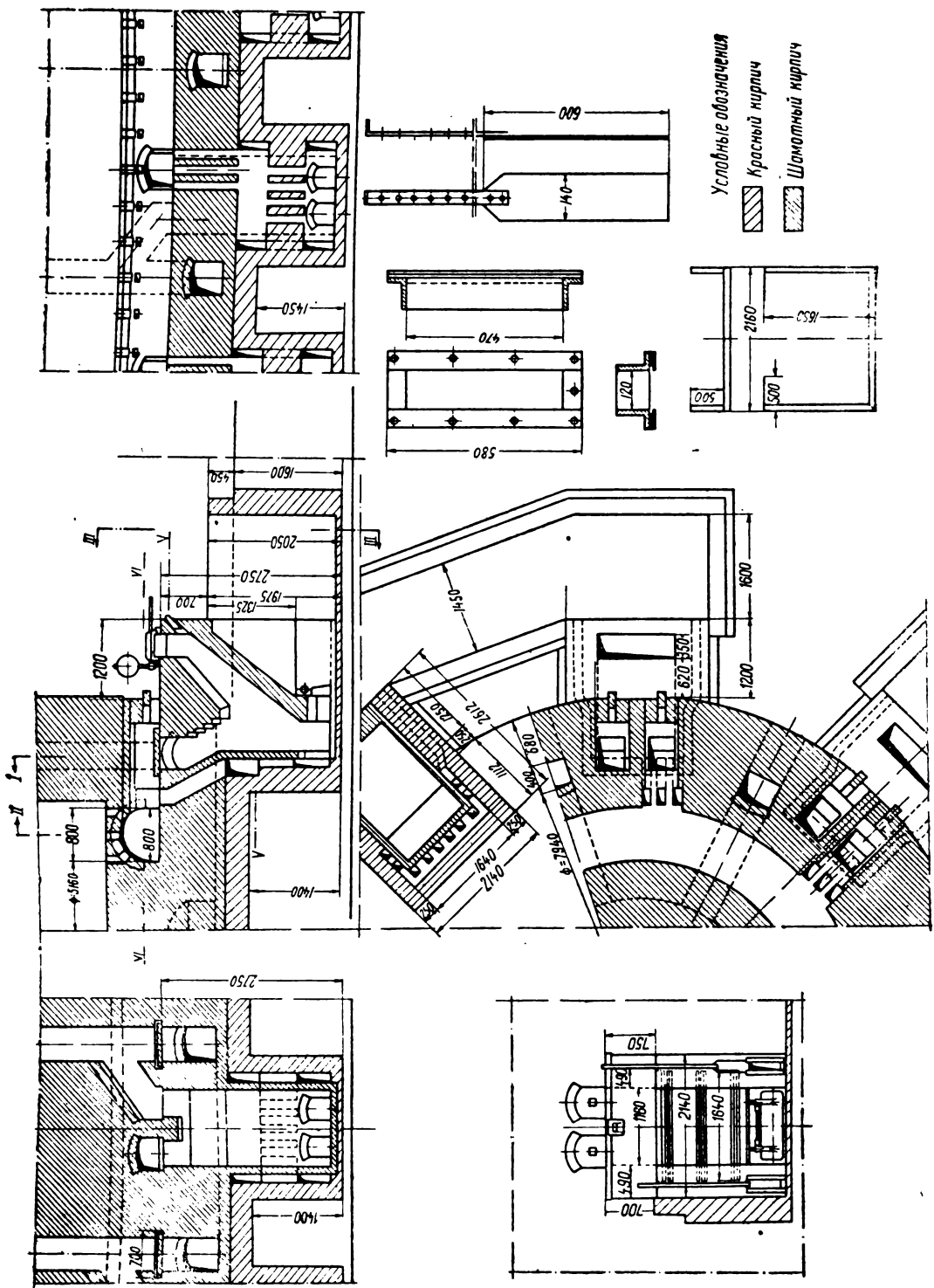


Рис. 41. Полуговая топка фарфорового горна



Широкий выводной канал для полугаза разделяется фасонным кирпичом (петушками) на ряд узких каналов, над которыми сбоку, под углом в  $90^\circ$ , подается вторичный (в данном случае более холодный) воздух (рис. 42). Для печей, в которых желательны иметь ровные температуры по всему сечению камеры и, следовательно, длинный факел пламени, в настоящее время печным отделом Мосгипромеза прорабатывается конструкция подводящих каналов для полугаза и вторичного воздуха в соответствии с конструктивными особенностями и специфическими требованиями отдельных промышленных печей.

## II. Устройство газогенераторов

### 1. Газогенераторы для дров

Газогенераторная установка Хайтинского фарфорового завода состоящая из трех простой конструкции генераторов и установки для грубой очистки газа, благодаря надежной работе и небольшой стоимости, представляет для керамических заводов, работающих на дровах, значительный интерес.

Газогенераторная станция была оборудована местными средствами без помощи крупных машиностроительных заводов. Постройка и эксплуатация подобного типа генераторов не встретит особых затруднений на любом керамическом заводе.

Помещение, в котором размещены газогенераторы, как видно из рис. 43, примыкает непосредственно к туннельному корпусу, а устройство для грубой мокрой очистки газа от пыли и смолы оборудовано рядом под открытым небом. Газогенераторная станция работает на метровых дровах и снабжает газом две туннельные печи для политого обжига фарфора и один короткий туннель для закрепления красок в живописном цехе. Из трех, расположенных в одном блоке, генераторов постоянно работают два, третий — в резерве. Делались попытки (которые пока из-за недостаточной подготовки газогенератора не увенчались успехом) в резервном газогенераторе газифицировать местный черемховский уголь.

Прямоугольная шахта каждого генератора имеет в ширину 1275 мм и в длину 2020 мм; наибольшая, заполняемая топливом и золой, высота шахты (от зольника до выходного бокового канала) — 4640 мм. В нижней части шахта суживается по ширине, во избежание прорыва воздуха через щели, которые получаются вследствие неплотного заполнения шахты дровами. Загрузка топлива в генераторы производится через коробки системы Смирнова с двойными заслонками и водяными затворами, во избежание попадания газа в помещение станции. Шахта не имеет колосниковой решетки; зола удаляется периодически, через боковые отверстия, показанные на рис. 44. Воздух подается под давлением от вентилятора, установленного в подвальном помещении, через патрубки, выходящие в шахту, на уровне, примерно 0,8 м от пола зольника. Вода подается в зольник через заслонки, поддерживающие топливо в шахте, и выбрасывается через небольшие отверстия в виде тонких струй на раскаленный уголь. Таким образом охлаждаются заслонки и в нижнюю часть шахты подается нужное количество пара вместе с воздухом. Подача и выключение воздуха регулируются шиберами.

Получаемый в генераторах газ отводится через боковые отверстия в коллектор (см. рис. 43), имеющий следующие внутренние размеры: длина — 5320 мм, ширина — 1750 мм и наибольшая высота —

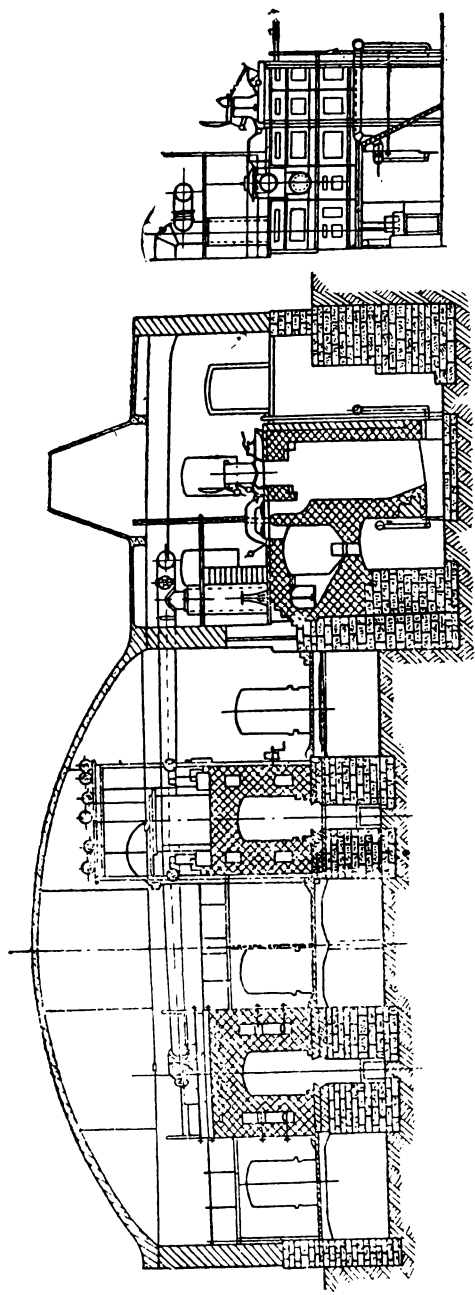


Рис. 43. Газогенераторная станция Хайтинской фабрики (и газопровод в туннельный цех)

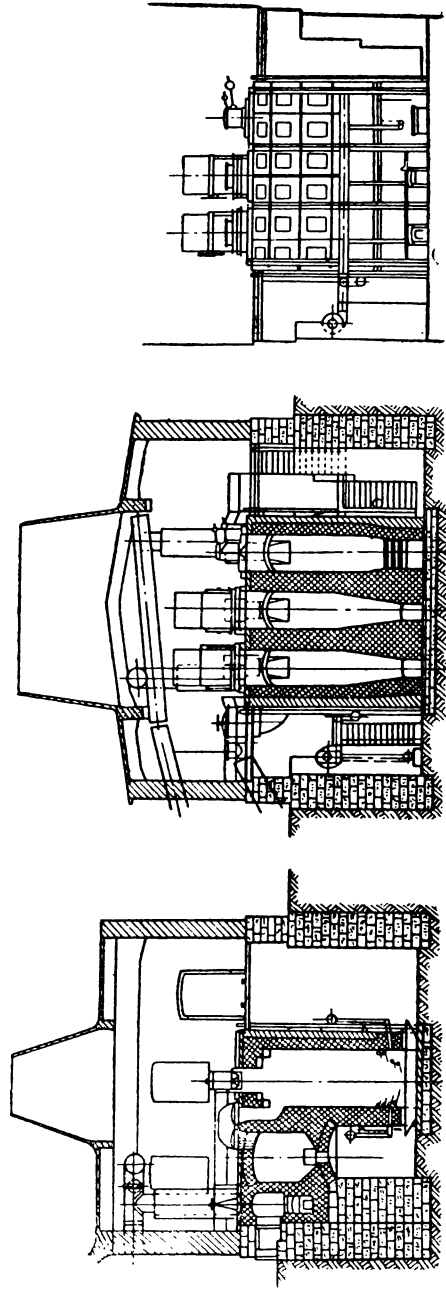


Рис. 44. Газогенераторы для дров (разрезы)

2000 мм. Генераторы выложены из кирпичной кладки без металлических кожухов и футерованы огнеупорным кирпичом.

Присоединение газохода генератора к входному каналу коллектора производится открытием двух подъемных клапанов, перекрывающих газоходы под клепаным колпаком, изолирующим оба газохода от окружающей атмосферы с помощью водяного затвора. Водяной затвор колпака исключает возможность попадания газа в помещение станции.

Устройство коллектора имеет целью компенсировать неравномерность работы отдельных газогенераторов; попутно в коллекторе оседает часть смолы и крупной пыли. Из коллектора газ может подаваться в туннельный цех двумя путями — через очистительную установку или, минуя ее, непосредственно к печам, что может иметь место лишь в исключительных случаях при чистке или ремонте очистительных установок.

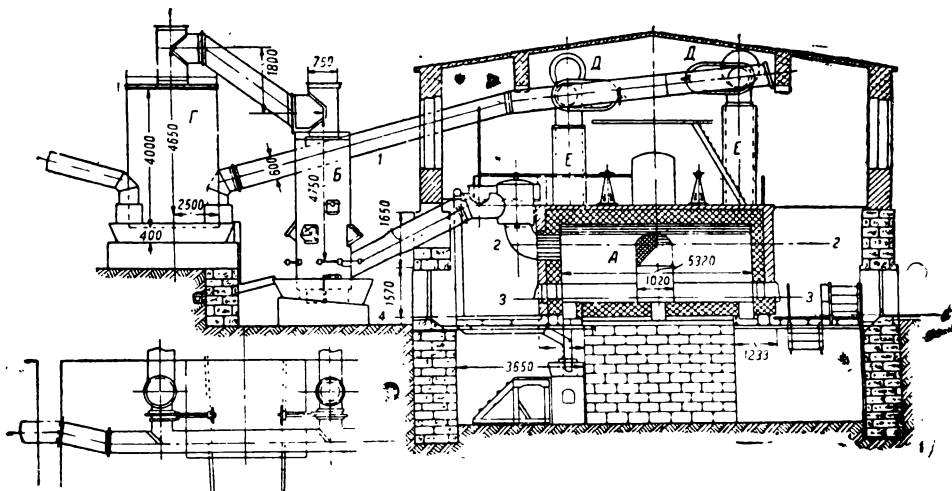


Рис. 45. Газоочистительная установка для дровяного газа

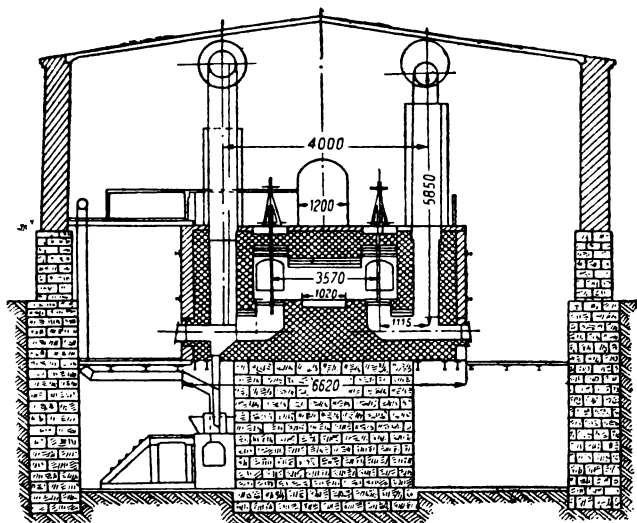
В нормальных производственных условиях газ проходит из коллектора А (рис. 45) через цилиндрическую коробку запорного вентиля и наклонный газопровод в скруббер В, наполненный коксом, который непрерывно поливается разбрызгиваемой водой. Кожух скруббера погружен нижним бортом в водяную ванну, в которую стекают выделяемые из газа смола, пыль и подсмольная вода. Из верхней части скруббера газ поступает по трехметровому газопроводу в верхнюю часть второго очистителя Г, где проходит вторую очистку водяным душем. После второй очистки газ отводится по двум газопроводам, выходящим из нижней части скруббера в туннельные печи голитого обжига направо и в короткий туннель — налево.

Во время осмотра установки, за отсутствием кокса, скруббер был наполнен деревянными чурбаками.

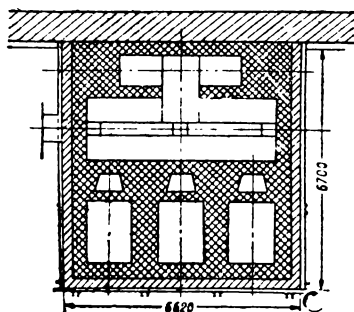
Первый газопровод проходит через помещение газогенераторной станции, где присоединяется к самостоятельным магистралям печей с помощью двух заслонок „Лудло“. К этим же магистральным газопроводам Д подведены и вертикальные стояки Е, соединяющие с ними коллектор А. На рис. 46 показаны план и разрез через распределительную камеру коллектора, вентили и вертикальные стояки, по

которым газ из коллектора может подаваться в любой туннель, минуя очистительную установку.

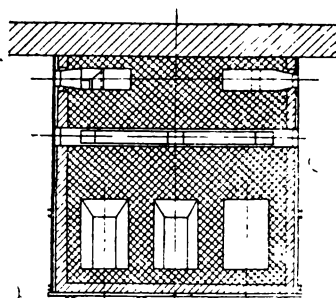
Короткий туннель (для закрепления красок) Хайтинского завода нельзя питать неочищенным газом, так как он работает с непосредственным омытием изделий пламенем (в отличие от печей муфельного типа). Поэтому нет надобности в устройстве газопровода, питающего эту печь сырым газом, непосредственно от коллектора.



А



Б



В

Рис. 46. Газовый коллектор и резервные стояки для подачи неочищенного газа

Описанная выше газогенераторная установка, хотя и является весьма простой по конструкции, все же требует выполнения ряда условий, обеспечивающих регулярную работу генераторов и связанных с ними печей.

Первым условием, обеспечивающим предприятие от аварий и несчастных случаев, является хорошая предварительная подготовка персонала, обслуживающего газогенераторы, и составление тщательно продуманных инструкций для него. Чаще всего аварии, хлопки, взрывы и ожоги получаются при остановках, пусках и чистке газогенераторов, коллекторов, клапанов и газопроводов; поэтому такие

работы должны производиться под наблюдением высококвалифицированных специалистов.

Вторым условием надлежащей эксплуатации газового хозяйства является правильная утилизация смолы и подсмольной воды в целях снижения стоимости газа и сохранения чистоты в помещениях, а также своевременный ремонт всех трубопроводов и других устройств во избежание утечки газа. На рис. 45 показана очистительная установка (Б, Г) с разводящими магистралями для газа; подсмольная вода, содержащая уксусную кислоту, не утилизируется.

Газогенераторы Хайтинского завода по выборочным анализам и замерам<sup>1</sup> имели в 1932 г. следующие показатели работы:

	Состав генераторного газа			
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	Н <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> . . . . .	6,8	5,2	8,5	5,6
O <sub>2</sub> . . . . .	1,4	2,2	1,3	1,2
CO . . . . .	11,6	10,8	10,0	12,6

Проверка работы очистительной установки (10—12/VII 1932 г.)<sup>1</sup> дала следующие показатели загрязнения газа на отдельных этапах очистки.

В 1 м<sup>3</sup> газа, отобранного между генератором и коллектором, содержалось:

Смолы . . . . .	0,06 кг
Пыли . . . . .	0,02 "
<hr/>	
Всего . . . . .	0,08 кг

Принимая суммарное содержание загрязнений в сыром газе на указанном участке (0,08 кг) за 100%, получаем содержание примесей, подлежащих удалению путем очистки на следующих участках:

Между коллектором и газоочистителем . . . . .	94%
После первого скрубера . . . . .	54%
После второго очистителя . . . . .	46,5%

При полной нагрузке двух туннельных печей политого обжига и короткого туннеля для закрепления красок, в двух газогенераторах Хайтинского завода газифицируется в сутки около 80 м<sup>3</sup> дров хвойных пород.

Всестороннее обследование этой газогенераторной станции не производилось и ее действительная производительность и эффективность точно не выявлены. Газогенераторы работают бесперебойно.

## 2. Газогенераторы для торфа

В зависимости от требований, предъявляемых к получаемому в газогенераторах торфяному газу, намечаемых условий эксплуатации и объема капитальных затрат на оборудование, в заводской практике получили применение разнообразные конструкции торфяных газогенераторов и очистительных устройств. Наибольшее влияние на конструкцию газогенераторов оказывает количество золы в торфе и степень ее легкоплавкости, а также намечаемые возможности утилизации весьма ценных отходов — смолы и подсмольной воды. Большое количество легкоплавкой золы, а также стремление к сокращению штатов обслуживающего персонала привели к разра-

<sup>1</sup> По материалам комиссии, обследовавшей Хайтинский завод в июле — августе 1932 г.

ботке довольно сложных конструкций газогенераторов с вращающимися колосниковыми решетками, автоматическим удалением золы и тому подобными устройствами. Разнообразное использование продуктов сухой перегонки топлива в разных отраслях промышленности (в химической, в производстве пластмасс и др.) послужило стимулом к совмещению в одном газогенераторе двух процессов: 1) сухой перегонки (швелевания) с получением наиболее ценных продуктов и 2) газификации твердого остатка.

Сложные и дорогие конструкции оборудования оправдываются, обычно, лишь при крупной производительности газогенераторной станции и при наличии других предпосылок (обеспеченный сбыт отходов и пр.). Установки с небольшой производительностью часто оборудуются газогенераторами разных простейших конструкций, сходными с газогенератором, описанным проф. В. Е. Грум-Гржимайло.

Этот газогенератор имеет цилиндрическую, расширяющуюся книзу шахту, круглую, корзиночного типа, колосниковую решетку и загрузочный аппарат с крышкой и распределительным конусом.

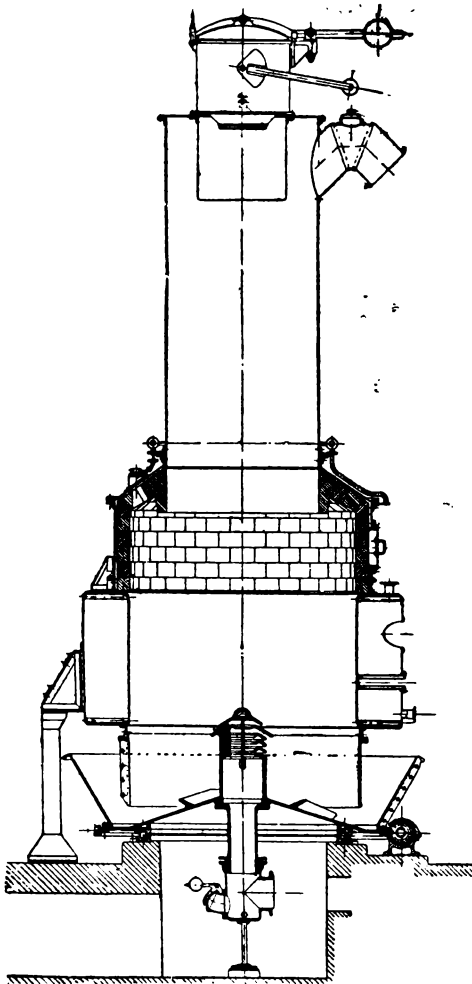


Рис. 47. Газогенератор для торфа типа А.Ф.Г. с вращающейся решеткой

Высота генератора от пола зольника до верхнего обреза шахты 7 м, а самой шахты — 5 м. Диаметр шахты вверху 2,5 м, внизу 3 м. Шахта вмещает 30 м<sup>3</sup> торфа. Газ отводится через боковой газход.

Суточная производительность генератора — 120 м<sup>3</sup>, или 24 т, площадь колосниковой решетки (по кругу, диаметром в 2,5 м) — 4,9 м<sup>2</sup>, часовая производительность 1 м<sup>2</sup> решетки 200 кг/м<sup>2</sup>.

Проектные данные газогенератора: Сырого газа должно получаться 0,76 м<sup>3</sup>/сек; сухого газа 0,65 м<sup>3</sup>/сек, водяного пара 0,11 кг/сек.

Расход воздуха в генераторе при 0° 0,41 м<sup>3</sup>/сек; расход воды под колосники 0,02 кг/сек.

Расчетная температура газа 250° С.

Золы (при 8% содержании ее в торфе) будет получаться 2 т в сутки, подсмольной воды при пользования конденсатором 8 т в сутки.

### 3. Газогенераторы для торфа с вращающейся колосниковой решеткой

Наиболее современное оборудование имеет газогенераторная станция, построенная на заводе бемского стекла „Гусь Хрустальный“ и сходные с ней газогенераторные станции, запроектированные для реконструируемых Дулевского и Калининского заводов. Она оборудована газогенераторами оригинальной конструкции (Koller), имеющими верхнюю шахту для швелевания торфа (возгонка протекает при температурах, обеспечивающих получение ценных продуктов возгонки — нерасщепленных смол).

Установка подобного типа генераторов для газификации торфа намечается также в проектах постройки и реконструкции крупных керамических заводов. Шахта, где протекает основной генераторный процесс в зоне высокой температуры (рис. 47), имеет водяную рубашку, которая дает пар, используемый для вдувания под колосниковую решетку генераторов и для других нужд станции. Водяная рубашка имеет в высоту 1950 мм. Остальная часть нижней шахты футерована огнеупорным кирпичом.

Верхняя шахта генератора (швельшахта) имеет в высоту 4080 мм и представляет собой железный цилиндрический кожух без футеровки. Загрузочная коробка имеет обычный двойной затвор — крышку и распределительный конус для равномерной загрузки шахты.

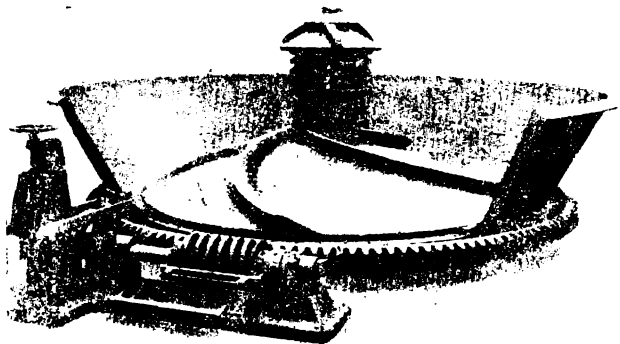


Рис. 48. Зольниковая чаша с центральным подводом воздуха

Воздух в генератор подается увлажненным через так называемый kern, устроенный в центре вращающейся зольниковой чаши (рис. 48). На дне чаши имеются винтообразные ребра, которые при вращении чаши передвигают золу от центра генератора к периферии и выбрасывают ее в поставленные рядом вагонетки. Зольниковая чаша приводится в движение с помощью червячной передачи

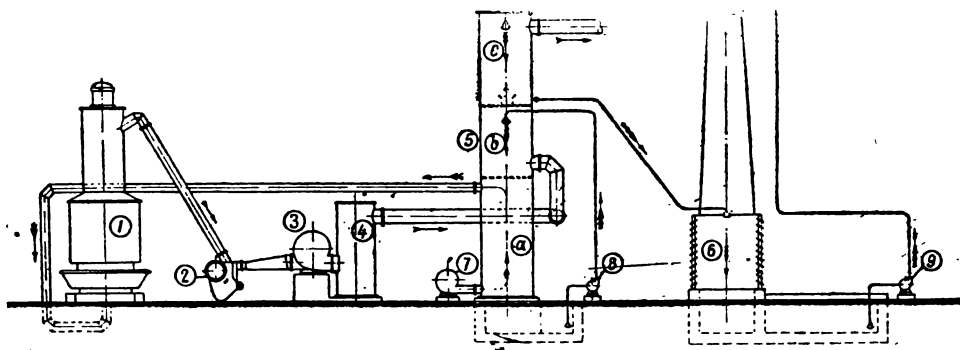


Рис. 49. Схема газоочистительной установки для торфяного газа

и храпового механизма. Последний регулирует амплитуду качаний рычага и число оборотов червяка, что в свою очередь дает более или менее быстрое удаление золы из газогенератора в соответствии с колебаниями его производительности и зольности топлива.

Продукты газификации из нижней шахты газогенератора поступают в верхнюю и отдают свое физическое тепло свежезагруженному торфу; за счет этого тепла происходит швеление (частичная сухая перегонка) и подсушка торфа. Смесь  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  и продуктов перегонки —  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ , смол, паров уксусной кислоты, воды и пр.

отбирается из газогенератора через боковые газоотводы и поступает в установку для очистки газа. На газовой станции завода „Гусь Хрустальный“ принята следующая схема газоочистки: генератор — гидравлические затворы — тайзены — каплеуловитель — скруббер (рис. 49).

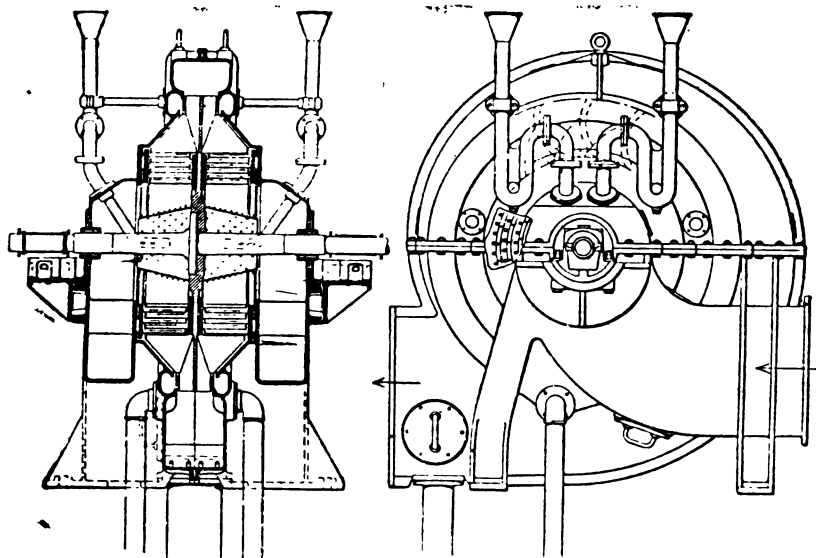


Рис. 50. Тайзен газоочистительной установки

Газ, попадающий в гидравлические затворы, при падении скорости и перемене направления газового потока отдает здесь крупно-

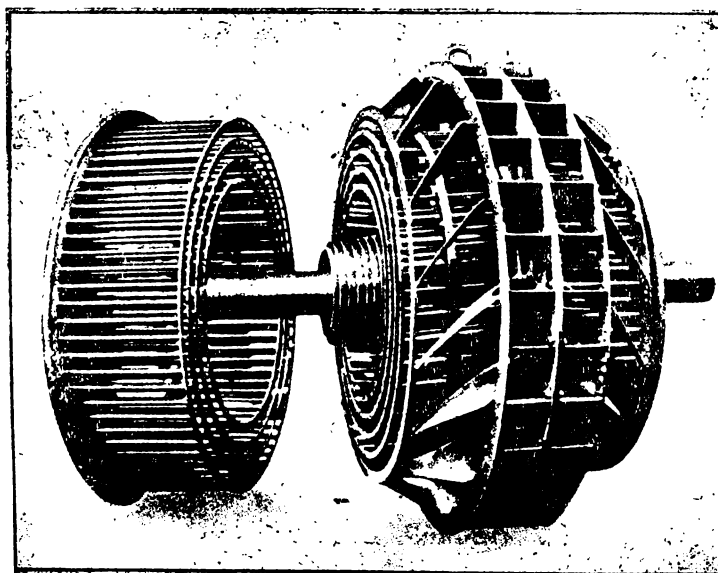


Рис. 51. Ротор тайзена

взвешенные твердые частицы и высоко-кипящие продукты сухой перегонки и поступает в механические очистители — тайзены, кото-



рые одновременно служат и побудителями движения газа по всей очистительной системе (вентиляторами). В тайзенах газ освобождается от смол, находящихся в тонко дисперсном состоянии; они конденсируются здесь в крупные капли. Как видно из рис. 50 и 51, тайзен представляет собой комбинацию дезинтегратора с центробежным вентилятором. Вращающаяся часть (ротор) тайзена (см. рис. 51) состоит из диска, на котором с обеих сторон имеется по несколько концентрически расположенных венцов с частыми стальными пальцами и лопасти турбинного колеса. На кожухе с двух сторон ротора укрепляются неподвижные стальные диски с четырьмя венцами пальцев, входящих между пальцами ротора.

В центре ротора имеется круглая дырчатая труба, в которую подается часть ранее выделенной из газа смолы. Под влиянием центробежных сил эта смола через отверстие трубы разбрызгивается между многочисленными вращающимися пальцами ротора среди отсасываемого тайзеном газа и служит основанием для образования бесчисленных очагов конденсации смолы.

Смесь газа с укрупненными каплями смолы подается в каплеуловительную шахту, наполненную кольцами Рашига, где последняя собирается и периодически выпускается в специальный сборник (яму). Газ с оставшимися фракциями смолы, кипящими при низкой температуре, поступает в дальнейшем в скруббер для окончательной очистки, охлаждения и освобождения от паров воды.

Скруббер имеет три слоя колец наполнителей. Газ проходит снизу (рис. 52) через средний и верхний слой колец навстречу водяному душу. Средний слой колец отбирает от газа оставшиеся в нем после каплеуловителя масла. Вода вместе с маслами поступает в отстойники, а после отделения масел проходит через нижний ярус колец наполнителей, где увлажняет и подогревает воздух, идущий на питание газогенераторов.

Газ, очищенный от масел, проходит верхний ярус колец наполнителей и охлаждается вторым водяным душем. Подогретая вода подается в градирню для охлаждения и потом опять подается в верхнюю часть скруббера на охлаждение газа, завершая свой круговой цикл.

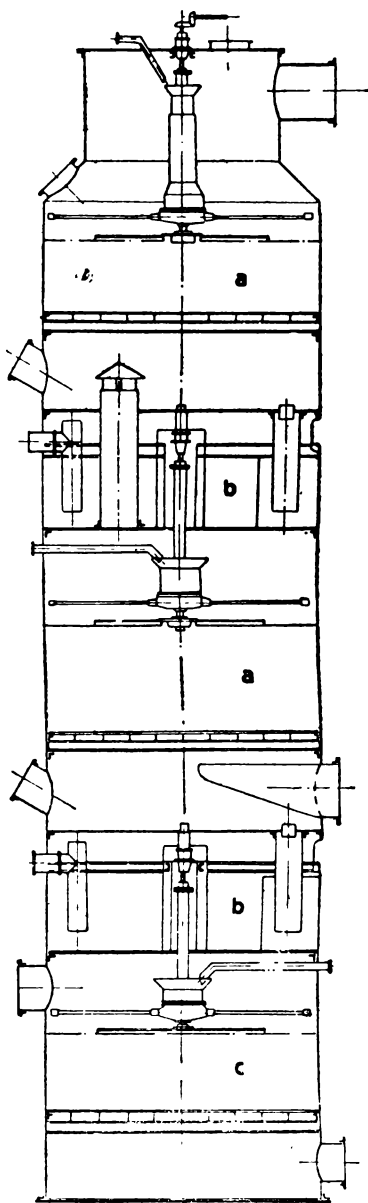


Рис. 52. Скруббер газоочистительной установки

#### 4. Работа газогенератора на торфе и тепловой баланс

Работа газогенераторной станции завода „Гусь Хрустальный“ проверялась Ленинградским областным теплотехническим институтом,<sup>1</sup> откуда позаимствованы приводимые данные о работе газогенераторов и установки для очистки газа (см. таблицу на стр. 115).

Работа газогенераторной станции завода „Гусь Хрустальный“ показала, что задача газификации торфа с отбором ценных продуктов сухой возгонки (швелевание) в общем удовлетворительно решается в газогенераторах описанной системы.

Смола и легкие масла используются разными предприятиями химпромышленности. В 1929/30 г. в газогенераторах вместе с кусковым торфом использовалась торфяная крошка (всего за год 1500 т). Очевидно, в известных пределах возможно вместе с кусковым использовать и фрезерный торф.

Установка имеет и ряд недостатков. Главнейший из них — быстрое разъедание газопроводов и газоочистительной аппаратуры содержащимися в газе и смоле уксусной и другими кислотами. Предложенная фирмой нейтрализация кислот содой в каплеуловителях является паллиативом, не решающим вопроса. Повидимому, наиболее надежным путем к сохранению аппаратуры и устранению утечек газа является устройство специальных нейтрализаторов кислотности или кислотоупорных газопроводов. Разъедание железных трубопроводов в известной мере является большим вопросом и при газогенераторных установках, работающих на дровах, где также получают кислые возгоны. Вот почему на эту деталь проблемы газификации в проектах газогенераторных станций должно быть обращено серьезное внимание.

Необходимо также уделить особое внимание отбору, хранению и транспортированию смол и легких масел. В проектах этим вопросам, обычно, уделяется мало места, и в процессе эксплуатации рядом с высокой техникой газификации часто уживается кустарщина в использовании столь высокоценных продуктов и загрязнение всей прилегающей к станции площади смолой и подсмольными водами.

### III. Устройства для сжигания газообразного топлива

#### 1. Сжигание газа и требования, предъявляемые к топочным устройствам

Горючие газы легко смешиваются с воздухом и потому процесс их сжигания хорошо регулируется и протекает, обычно, с высокой эффективностью в смысле полноты горения и получения в печах равномерных температур. Питание и обслуживание газовых топков весьма просто и точно осуществляется системой вентиля, для управления которыми можно использовать все современные достижения в области автоматического регулирования процессов горения (регуляторы движения газа, температур в установленных точках, подачи воздуха и т. д.). К несомненным преимуществам газового отопления относится удобный транспорт газа по трубопроводам, позволяющий размещать топки в самых разнообразных точках печи без помехи производственным процессам и большой затраты рабочей силы, неизбежной при перебросках твердого топлива к месту потребления.

<sup>1</sup> М. А. Кузьмин, С. П. Михеев и А. С. Синельников. Керамические печи, вып. 2. Исследование газогенераторной установки на торфе в городе: Гусь Хрустальный. Тр. ЛОТИ, 1932.

	Данные испытания газогенератора № 7	Данные испытания всей уста- новки (8 газо- генераторов и очиститель- ная аппара- тура)	
	1. Расход торфа <sup>1</sup> в час (средн.) в кг . . . . .	1 633	9 606
2. Влажность торфа . . . . .	28,52	27,2	
3. Состав абсолютно сухого торфа:			
Содержание углерода С <sup>c</sup> в % . . . . .	55,96	53,76	
"    водорода Н <sup>c</sup> " % . . . . .	5,98	5,86	
"    летучей серы в % . . . . .	0,17	0,19	
"    зола А <sup>c</sup> в % . . . . .	3,35	4,74	
"    азота N <sup>c</sup> в % . . . . .	1,51	1,67	
"    кислорода O <sub>2</sub> в % . . . . .	33,03	33,78	
4. Выход летучих . . . . .	71,02	71,87	
5. Высшая теплотворная способность по калор. бомбе абсолютно сухого торфа в кал/кг . . . . .	5 330	5 215	
6. Высшая теплотворная способность влажного топлива . . . . .	3 800	3 788	
7. Получено газа в час в кг . . . . .	2 719	15 920	
8. Состав, температура и теплотворная способность газа Средний состав очищенного газа по анализу:			
Содержание CO <sub>2</sub> в % . . . . .	6,57	7,29	
"    O <sub>2</sub> " % . . . . .	0,47	0,34	
"    CO " % . . . . .	29,12	28,05	
"    N <sub>2</sub> " % . . . . .	45,00	43,73	
"    CH <sub>4</sub> " % . . . . .	2,47	2,77	
"    H <sub>2</sub> " % . . . . .	15,97	17,44	
	100,0	100,0	
Высшая теплотворная способность газа при 0° С, 760 мм рт. ст. в кал/м <sup>3</sup> . . . . .	1 672	1 710	
То же в кал/кг . . . . .	1 517	1 575	
Средняя температура газа в °С . . . . .	72	36	
9. Выход газа на 1 кг торфа . . . . .	1,66	1,66	
10. Выход золы из генераторов в кг/час . . . . .	55,9	392	
11. Содержание влаги в золе в % . . . . .	23,02	11,62	
12. Содержание горючих в абс. сухой золе в % . . . . .	11,84	2,86	
13. Расход воздуха в генераторах (дутье) в кг/час . . . . .	1 809	10 440	
14. Расход воздуха на 1 кг торфа в кг . . . . .	1,1	1,09	
15. Температура воздуха в °С . . . . .	53	53	
16. Влажность воздуха . . . . .	125,4	141	
17. Содержание продуктов возгонки в газе, установленное по их выделению в разных стадиях очистки:			
	кал	кг/час	в % к весу торфа
а) Смолы гидравлических затворов теплотв. способн.	8 568	8,6	0,09
б) Смолы каплеуловителей . . . . .	8 818	76,3	7,95
в) Возгоны в очищенном газе . . . . .	—	23,6	0,25
г) Легкие масла и отложения в скрубере и градирне	10 193	97	1,01
18. Расход электроэнергии в квт/час			
а) Тайзен № 1 . . . . .	—	—	69
б) " № 2 . . . . .	—	—	69

<sup>1</sup> В настоящее время, в результате стахановского движения, достигнута производительность одного газогенератора около 2,5 т в час, а на некоторых заводах (Урал) достигаются и более высокие нормы газификации (около 80 т в сутки).

	кал	кг/час	в % к весу торфа
в) Вентилятор дутья № 1 . . . . .	—	—	11
г) " " " № 2 . . . . .	—	—	11
д) Водяной насос горячего цикла № 1 . . . . .	—	—	9,25
е) " " " " № 2 . . . . .	—	—	9,25
ж) " " " " " " № 1* . . . . .	—	—	8,0
з) " " " " " " № 2 . . . . .	—	—	6,0
и) Трансмиссия скрубера . . . . .	—	—	0,8
к) " " генераторов . . . . .	—	—	2,5
<b>Всего . . . . .</b>	—	—	<b>198</b>
<b>19. Тепловой баланс . . . . .</b>	—	—	—

Приход	кал/час	%	кал/час	%
Теплотворная способность топлива . . . . .	6 205 400	97,77	36 385 700	97,42
Внесено дутьем из скрубера . . . . .	118 900	1,87	848 350	2,35
Внесено атмосферным, воздухом . . . . .	22 800	0,36	87 800	0,23
<b>Итого . . . . .</b>	<b>6 347 100</b>	<b>100</b>	<b>37 321 850</b>	<b>100</b>
<b>Расход</b>				
Химическая теплота газа . . . . .	4 124 700	64,49	25 067 640	67,17
Физическая " " . . . . .	56 500	0,89	167 750 <sup>1</sup>	0,45
Химическая " смол . . . . .	1 029 300	16,22	6 037 670	16,18
" " масел . . . . .	213 500	3,36	1 259 800	3,37
Физическая " смол и масел . . . . .	5 600	0,09	31 660	0,09
Теплосодержание влаги газа . . . . .	486 000	7,66	470 660	1,27
Химическая и физическая теплота золы . . . . .	41 500	0,65	80 260	0,21
На испарение воды в рубашк. генерат. . . . .	71 200	1,12	418 080	1,12
Потеря тепла охлаждением . . . . .	56 600	0,89	707 670	1,89
Уносится дутьем из скрубера . . . . .	—	—	848 350	2,27
" " охлаждающей водой . . . . .	—	—	1 229 480	3,29
Теплота неучтенная . . . . .	262 200	4,13	1 002 830	2,69
<b>Итого . . . . .</b>	<b>6 347 100</b>	<b>100</b>	<b>37 321 850</b>	<b>100</b>
20. К. п. д. газогенераторной установки . . . . .	$\eta \cong 91,83\%$			
21. К. п. д. с учетом расхода механической энергии, израсходованной на газогенераторной станций в переводе на тепл. един. . . . .	$\eta \cong 91\%$			

<sup>1</sup> Для очищенного газа.

Работа газовых топок или горелок не может рассматриваться самостоятельно, без учета процесса горения и теплопередачи в печной камере.

В топках для твердого топлива протекают более сложные явления, чем догорание топочных газов в печной камере. Поэтому в процессе сжигания твердого топлива доминирующую роль играют топки, которые могут, в иных случаях с известными оговорками, рассматриваться обособленно от работы печной камеры. Работа газовой горелки, в которой смешивается газ с воздухом и начинается горение, имеет меньший удельный вес в работе всей печной системы, чем топки для твердого топлива, поэтому изучение работы газовых горелок, как самостоятельных аппаратов, не дает достаточно ясного представления о горении газа и о роли печной камеры в этом процессе.

Определение топки, как аппарата для превращения скрытой энергии топлива в тепловую, теряет смысл, так как, обычно, не представляется возможным установить границу между процессом выделения тепла с повышением температуры топочных газов и отдачей тепла на подогрев изделий, загруженных в печную камеру. Поэтому под газовыми топками, или точнее горелками, в дальнейшем будем подразумевать устройство для регулирования пропорции газа и воздуха в горючей смеси, их первичного перемешивания и некоторого развития реакции горения. Газовые топки, как и нагревательные устройства иных типов (нефтяные форсунки, дровяные топки, электрические и т. д.), должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) давать достаточно высокую температуру, регулируемую в заданных пределах;
- 2) обеспечить равномерное распределение температур в печной камере и равномерный нагрев загруженных изделий;
- 3) иметь широкие возможности регулирования атмосферы в печи от восстановительной до резко-окислительной.

Одновременное выполнение второго и третьего условий в достаточно жестких рамках практически невозможно. Рассмотрим два крайних случая.

При наличии идеального смешения воздуха может иметь место весьма быстрое сгорание газа в горелке и тогда в печную камеру будут подаваться раскаленные газы с законченными реакциями горения, т. е. определенного состава и максимальной температуры.

При этом, в зависимости от пропорционирования газа и воздуха, в печной камере получается постоянная окислительная, нейтральная или восстановительная атмосфера, т. е. выполняется третье требование к топочному устройству. Однако, продукты с законченными реакциями горения по мере прохождения через печную камеру, загруженную обжигаемыми изделиями, будут постепенно охлаждаться и, таким образом, более удаленные от топки изделия будут омываться уже значительно охлажденными газами, вследствие чего их температура будет все время отставать от температуры нагрева изделий, расположенных у топочных вылетов. А это противоречит второму требованию — равномерного нагрева продукции по всем сечениям камеры. Неравномерный нагрев продукции при быстром горении газа в топке особенно резко выявляется в керамических печах с большой кубатурой камер.

Рассмотрим второй крайний случай горения, когда газы весьма недостаточно перемешиваются в топках и выходят в камеру в виде слоистого потока, в котором дальнейшее их смешение и догорание

протекают довольно медленно. При этом процесс догорания газов в печной камере иногда удается регулировать таким образом, что выделение тепла в газовом потоке в результате реакции горения происходит до выхода газов из камеры, в соответствии с теплоотдачей пламени загружаемым изделиям. В этом случае все изделия будут находиться в одинаковых условиях в смысле скорости нагрева, т. е. получится равномерный по температуре обжиг изделий. В то же время постепенное догорание газов в камере неизбежно сопровождается наличием свободного кислорода в начале горения, т. е. у топочных вылетов, и его постепенным убыванием по мере догорания газов и изменением среды от окислительной (перемежающейся) до нейтральной или восстановительной. Таким образом, получение во всех сечениях камеры равномерной, заданной по режиму обжига, газовой среды в этом случае становится невозможным.

Помимо двух описанных выше противоположных методов сжигания горючих газов, возможно осуществление и ряда промежуточных режимов горения с окончанием процесса на разных расстояниях от топочных вылетов. В зависимости от требований, предъявляемых к обжигу данного вида керамических изделий, и установленного режима обжига, определяются допуски на неравномерность температуры обжига и характер газовой среды, а также намечается наиболее приемлемый метод сжигания газа и соответствующие конструкции топков.

## 2. Типы горелок, их устройство и особенности

Легкость регулирования смеси газа с воздухом является причиной "относительной" несложности устройства и небольшого количества разных систем горелок. По Тринксу, газовые горелки классифицируются по следующим признакам:

I. По месту смешения газа и воздуха.

А. Газ и воздух смешиваются в печи в процессе горения.

Б. Газ и воздух смешиваются вне печи, до начала горения.

В. Газ смешивается с некоторым количеством воздуха вне сжигательной камеры, остальной необходимый воздух добавляется в печной камере.

II. По условиям питания печей газом и воздухом.

А. Газ и воздух подаются под давлением, превышающим давление в печи:

1) путем нагнетания механическими средствами;

2) благодаря работе дымовой трубы, обеспечивающей пониженное давление в печной камере; в этом случае возможны конструкции с самостоятельным регулированием подачи воздуха и газа или же подача их регулируется в твердо установленной пропорции взаимно связанными механизмами.

Б. Один из компонентов (воздух или газ) подается под давлением и путем инъекции всасывает газ, воздух или смесь, создавая в печи давление выше атмосферного.

III. По количеству пунктов сжигания газа.

А. Сжигание газа производится в одной большой горелке, обогревающей всю печь.

Б. Сжигание производится во многих мелких горелках (многофокусное горение).

В керамических печах, отапливаемых газом, в зависимости от их конструкции и от требований, предъявляемых к обжигу, приме-

применяются или могут найти применение в дальнейшем почти все типы газовых горелок.

Устройства, рассчитанные на сгорание газа в печной камере среди обжигаемых изделий, могут найти широкое применение в туннельных печах непрерывного действия, где сжигание газа в горячем воздухе среди изделий, раскаленных до температуры в  $1200\text{--}1400^\circ\text{C}$ , может протекать с высоким эффектом. Сжигание газа в раскаленной обжигаемой насадке должно протекать достаточно медленно по мере его смешения с горячим воздухом и потому есть возможность затянуть процесс горения в соответствии с теплоотдачей пламени, т. е. получить равномерную температуру обжига для изделий, находящихся на разном расстоянии от газовой горелки. Сжиганием газа непосредственно в печной камере сокращаются потери тепла на нагрев кладки топок и расходы по ее ремонту. При этой конструкции горелок должны быть предусмотрены специальные устройства для разогрева печей до установления нормального режима работы, обеспечивающие получение высоких температур в зоне обжига, необходимых для устойчивого горения газа, и устраняющие возможность взрыва смеси газа с воздухом.

При самостоятельном подводе газа и воздуха в печную камеру смешение их протекает за счет взаимной диффузии и образования вихрей, неизбежных при прохождении газа и воздуха среди обжигаемых изделий и способствующих завершению горения. При этом методе сжигания изделия на известном участке будут находиться в области так называемой перемежающейся атмосферы, поочередно окислительной и восстановительной. При неподвижной загрузке камеры пестрый газовый режим может быть причиной частичного брака ряда изделий, чувствительных к составу газовой среды (например фарфор, фаянс, каменный товар). Поэтому в подобных случаях данный тип горелок неприменим.

Иная картина получается в туннельных печах (например в туннелях Хайтинского завода), где изделия в области перемежающейся атмосферы находятся лишь после расплавления глазури во время пребывания вагонеток около газовых и воздушных вылетов. Кривые температуры и газовой среды можно при этом согласовать таким

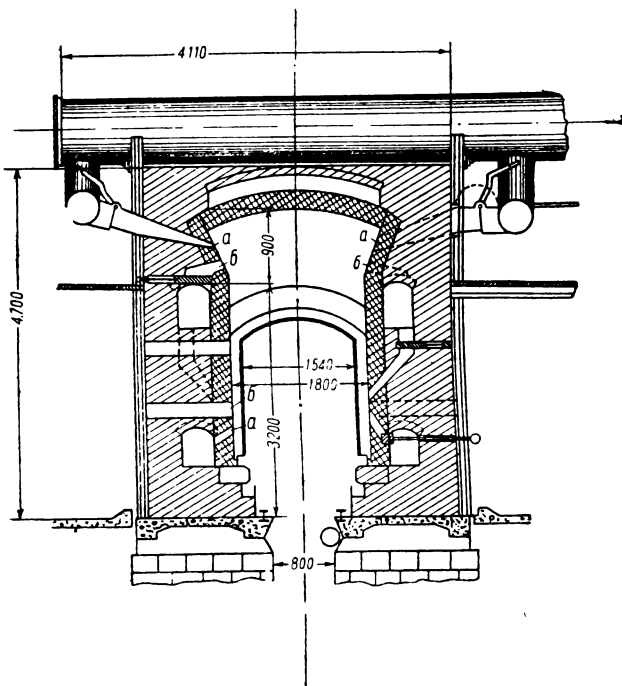


Рис. 53. Подача газа и воздуха в топочную зону туннельной печи

образом, что получаемый режим обжига обеспечит выход доброкачественной продукции. На рис. 53 показано размещение и устройство газовых *a* и воздушных *b* вылетов верхних и нижних горелок туннельной печи, отапливаемой очищенным газом (с невысокой степенью очистки). Газовые вылеты верхних горелок расположены выше отверстий, через которые подается горячий воздух из зоны охлаждения.

Менее нагретый газ опускается вниз, перемешивается с потоком поступающего снизу более горячего воздуха и достаточно быстро сгорает с короткой метлой пламени. В нижних горелках более холодный газ подается через нижние вылеты, а горячий воздух через верхние, поэтому газ и воздух текут параллельными струями; получается замедленный процесс горения с длинным пламенем. В туннельных печах, как правило, нагрев нижних рядов изделий в зоне подогрева отстает от верхней части загрузки и потому получающееся удлиненное пламя при замедленном горении в нижних ярусах вагонетки способствует выравниванию температур и более равномерному обжигу продукции.

На рис. 53 показаны разводящие газ трубопроводы с отростками, опущенными в корыто с водой, служащее водяным затвором и сборником остатков смолы, осаждающейся на трубопроводах и стекающей вниз. Газопроводы присоединяются к чугунным регулирующим аппаратам. Аппараты, регулирующие подачу газа, как видно из рисунка, имеют несложную конструкцию. В трубе прямоугольного сечения установлена шарнирная поворотная заслонка, дающая при перекрытии плавное сужение вылета с небольшими потерями напора газа. Выходящий наружу торец прямоугольной трубы аппарата герметически закрывается свободно подвешенной крышкой, через которую можно чистить горелку от смолы. Кроме того, при небольших хлопках (взрывах) газа в период пуска печи или при других нарушениях нормальной работы, свободно подвешенные крышки, а также и водяные затворы, обеспечивают свободное выметывание газов и предохраняют печь и трубопроводы от разрушения. При конструировании горелок для работы на сыром или недостаточно очищенном газе особое внимание уделяется надежности их работы и устранению всех причин для скопления смолы и пригорания поворотных заслонок.

Расположение шарнира заслонки сверху трубы, в известной мере, предохраняет ее от заплывания смолой и облегчает регулирование подачи газа. В печах, где для сжигания газа отведен значительный незагруженный изделиями объем камеры, можно получить замедленный процесс горения путем направления газовых и воздушных потоков параллельно друг другу с равными скоростями.

Смешение газа с воздухом, при их слоистом течении в печной камере, происходит благодаря диффузии газа в воздушную струю и воздуха в струю газа. Повышение температуры продуктов сгорания и расширение их в пограничной зоне способствуют процессу диффузии. Интенсивность смешения характеризуется в этом случае углом диффузии (проникновения газа в воздушную струю и наоборот), который при равных скоростях движения газа и воздуха колеблется в пределах 3—4°. В керамических печах, обычно, не обеспечивается слоистое движение потоков с равными скоростями и потому установление расчетной скорости смешения, горения, а следовательно и длины факела, является весьма сложной задачей, требующей для разрешения большого практического опыта в области эксплуатации газовых печей.



Смешение газа с воздухом вне печной камеры обеспечивает постоянство газовой атмосферы в печной камере и быстрое развитие горения, т. е. короткое пламя высокой температуры. Нагревательные и плавильные печи металлопромышленности, ванны печи для плавки стекла, эмалей и глазурных фрит, требующие сосредоточенного воздействия пламени на коротком его пути, обычно, оборудуются газовыми горелками с частичным или полным смешением газа и воздуха вне печной камеры. Быстрое и полное перемешивание газов с незначительной отдачей тепла из факела (за короткий период времени от начала до конца горения) дает более высокие температуры пламени, чем при сжигании с замедленным смешением непосредственно в печной камере. Топочные газы с законченными реакциями горения прогревают изделия, загруженные в печи больших размеров, недостаточно равномерно; более удаленные от горелок отстают по температурам от изделий, расположенных в области догорания газа.

Отмеченное обстоятельство ограничивает область применения в керамической промышленности газовых горелок с предварительным смешением. Они применяются лишь в печах малой емкости для обжига продукции, допускающей значительную разницу температур.

Горелки промежуточного типа с частичным смешением газа и воздуха в самой горелке и окончанием процесса в печной камере получили более широкое применение в керамической промышленности. Так называемые телескопические горелки туннельных печей системы Ленгерсдорфа относятся к этой категории топочных устройств. Воздух в таких горелках может примешиваться к газу в любой пропорции, остальная его часть подается в камеру для догорания газа среди обжигаемой продукции. Широкое регулирование подачи воздуха в горелку и печную камеру, его температуры и скоростей позволяет получить факел пламени желательной длины и температуры, в зависимости от предъявляемых технологических требований.

Горелки полного и частичного предварительного смешения чаще всего работают по принципу инжекции. Конструкция газовых горелок в значительной мере определяется способом их питания газом и воздухом.

Подача газа и воздуха в горелки может производиться, в зависимости от местных условий, по одной из следующих схем:

- 1) газ и воздух поступают в горелку под давлением с самостоятельной регулировкой в широких пределах;
- 2) газ подается под давлением и всасывает (инжектирует) необходимый для горения воздух;
- 3) воздух подается под давлением и всасывает газ.

Устройства для питания горелок с широким и самостоятельным регулированием подачи газа и воздуха могут удовлетворять разнообразным требованиям керамического производства и давать разную степень развития горения непосредственно в горелке с перенесением догорания газов в печную камеру за счет вторичного воздуха.

При питании топок по второй и третьей схеме часто не удается получить желательного развития и регулирования процесса горения в топке. Расчеты, приведенные в специальных руководствах, показывают, что бедные газы, например воздушный генераторный газ, нагнетаемые в горелки через специальные инжекционные устройства, могут всасывать из атмосферы количество воздуха, достаточное для полного горения. Более богатые газы, требующие для полного сгорания больших объемов воздуха, даже при значительном их давлении

нии, поступая в инжекторную горелку, не обеспечивают подсоса воздуха, необходимого для полного сгорания. В этом случае возможно лишь неполное сгорание в топке с последующим окончанием процесса горения уже в самой печной камере за счет вторичного воздуха.

Для получения полного сгорания богатого газа в пределах топки, а также для получения окислительной атмосферы без применения вторичного воздуха

*газ под атмосферным давлением поступает от регулятора*

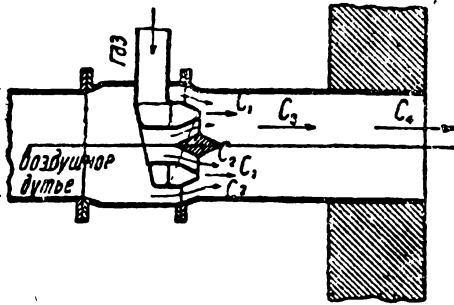


Рис. 54. Инжекторная горелка для богатого газа

требовалось бы применить третью схему питания горелок, т. е. подавать воздух под высоким давлением, засасывая богатый газ. Однако, подача газа под разрежением не практикуется, так как в этом случае в газовую сеть через неплотности засасывается воздух и может получиться взрывчатая смесь. Это грозит опасностью разрушения оборудования и человеческими жертвами.

Поэтому при подаче воздуха под высоким давлением засасываемый газ подводится к горелке также с некоторым положительным давлением (близким к атмосферному). На рис. 54 схематически показано устройство горелки, в которой воздух засасывает богатый природный газ. Расчетное сечение всасывающей трубы  $88,4 \text{ см}^2$ ; сечение отверстий для газа  $8,84 \text{ см}^2$ ; сечение воздухопровода в месте присоса газа  $51,5 \text{ см}^2$ .

Поэтому при подаче воздуха под высоким давлением засасываемый газ подводится к горелке также с некоторым положительным давлением (близким к атмосферному). На рис. 54 схематически показано устройство горелки, в которой воздух засасывает богатый природный газ. Расчетное сечение всасывающей трубы  $88,4 \text{ см}^2$ ; сечение отверстий для газа  $8,84 \text{ см}^2$ ; сечение воздухопровода в месте присоса газа  $51,5 \text{ см}^2$ .

Показанная на рисунке горелка рассчитывалась для следующих условий работы: расход газа  $34 \text{ м}^3/\text{час}$ , скорость движения полученной смеси газа и воздуха  $12,2 \text{ м/сек}$ , а давление в печи  $0,625 \text{ мм вод. ст.}$

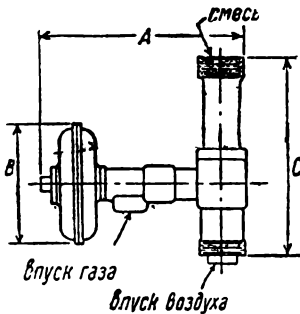


Рис. 55. Смеситель горелки (газ инжектируется воздухом)

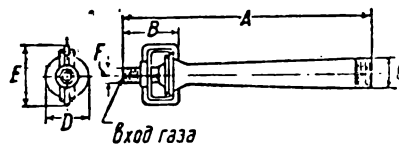


Рис. 56. Инжекторная горелка (воздух инжектируется газом)

В горелках, работающих по принципу инжекции, при увеличении и уменьшении подачи газовой смеси неизбежно нарушается и установленное соотношение между подачей воздуха и газа, следовательно, меняется кроме температуры также и состав продуктов горения. В литературе описаны разные специальные устройства, имеющие целью поддерживать постоянную пропорцию газа и воздуха при разных форсировках горелок.

На рис. 55 показана схема смесителя горелки, в которой воздух

засасывает газ, а в таблице 40 приведены основные размеры горелок этого типа разной мощности (по Тринксу).

Устройство для смешения нагнетаемого под давлением газа с воздухом, который инжектируется газом, показано на рис. 56.

В таблице 41 приведены размеры для смесителей этого типа.

Таблица 40

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СМЕШЕНИЯ ГАЗА И ВОЗДУХА

Диаметр труб в см			Основные размеры смесителя для газа и воздуха (см. рис. 55) в мм			Максимально допустимое часовое количество газа (4750 кал/м <sup>3</sup> ) при избыточном давлении воздуха в 0,07 ат в м <sup>3</sup>	Максимально допустимое часовое количество воздуха при избыточном давлении в 0,07 ат в м <sup>3</sup>
газ	воздух	смесь	A	B	C		
2,5	2,5	2,5	28,7	19,7	19,0	7,32	31,8
2,5	3,8	3,8	30,2	19,7	24,1	15,86	12,2
3,8	5,1	5,1	34,0	23,5	34,2	34,0	153,0
3,8	6,35	6,35	34,9	23,5	38,4	52,1	253,0
6,35	7,6	7,6	41,9	34,9	45,3	72,2	323,0
6,35	12,7	12,7	56,5	34,9	81,7	205,1	803,0

Таблица 41

РАЗМЕРЫ СМЕСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ГАЗА И ВОЗДУХА

Основные размеры смесителя для газа и воздуха (см. рис. 56) в мм						Максимально допустимая часовая подача газа в м <sup>3</sup>		
A	B	C	D	E	F	светильный газ 4750 кал/м <sup>3</sup> ; отношение количества воздуха к количеству газа 4,5; давление газа 0,7 ат	водяной газ 2560 кал/м <sup>3</sup> ; отношение количества газа к количеству воздуха 2,1; давление газа 0,49 мм	генераторный газ 1335 кал/м <sup>3</sup> ; отношение количества газа к количеству воздуха 1,5; давление газа 0,07 ат
27	8,6	2,5	4,5	8,3	9,5	6,25	12,7	—
29,2	10,8	2,5	4,5	8,3	1,9	—	—	9,6
32,1	8,6	3,2	5,4	8,9	1,27	9,1	18,4	—
34,3	10,8	3,2	5,4	8,9	1,9	—	—	13,5
37,2	8,4	8,8	6,5	10,5	1,27	13,0	26,2	—
39,4	11,1	3,8	6,5	10,5	2,5	—	—	19,8
45,4	12,1	5,1	7,5	14,0	1,9	19,1	39,6	—
47,6	14,3	5,1	7,5	14,0	2,5	—	—	30,4
56,5	11,8	63,5	9,8	16,5	1,9	28,4	56,7	—
59,0	14,0	63,5	9,8	16,5	3,18	—	—	44,0
64,5	12,7	7,6	10,8	17,2	1,9	47,0	92,1	—
66,7	17,5	7,6	10,8	17,2	3,8	—	—	71,0
74,3	12,7	8,9	12,9	18,7	2,5	65,2	130,4	—
76,5	17,5	8,9	12,9	18,7	3,8	—	—	96,4
84,5	12,7	10,2	15,2	21,6	7,5	93,5	187,0	—
86,7	17,5	10,2	15,2	21,6	5,1	—	—	141,5

IV. Устройства для сжигания жидкого топлива

1. Принципы работы топок для жидкого топлива

При разведанных до настоящего времени мировых запасах нефти и все возрастающем потреблении как сырой нефти, так и про-

изводных, в качестве моторного топлива, — использование жидкого топлива в керамических производствах СССР вряд ли сможет получить значительное распространение. Однако, в некоторых печах, где требуется получение весьма высокой температуры, а также в районах, где снабжение нефтью или мазутом по условиям транспорта и другим причинам является наиболее выгодным или единственно возможным, применяются разнообразные устройства для сжигания жидкого топлива.

В пределах этой главы не представляется возможным описать чрезвычайно большое количество систем и конструкций топок для сжигания нефти, мазута и каменноугольной смолы, описанных в специальной и патентной литературе.

В основу всех конструкций положены общие принципы сжигания жидкого топлива, несколько способов подготовки горючего и подачи воздуха в топку.

Мазут, нефть и каменноугольная смола имеют температуру воспламенения более высокую, чем температура превращения их в пар, и потому во всех топках и горелках неизбежно предварительное превращение топлива в парообразное состояние. Испарение жидкого топлива может происходить тремя способами: 1) с открытой поверхности под действием температуры горения получающихся паров горючего, 2) путем подачи капель горючего в поток горячего воздуха и, наконец, 3) с помощью устройств для предварительного превращения топлива в пыль.

По этому признаку топку можно подразделить на:

- 1) устройства типа колосников Нобеля;
- 2) капельниковые топки;
- 3) топки с распылителями (форсунками).

Колосники Нобеля являются наиболее примитивным устройством для сжигания нефти и мазута. Этот тип горелки состоит из продолговатых чугунных чаш, установленных одна на другую (наподобие ступенчатой решетки для твердого топлива).

Нефть или подогретый мазут поступает в верхнюю чашу, переливается через ее край в нижестоящую, из второй в третью и т. д., наполняя все чаши. Испарение горючего происходит за счет тепла, получаемого от факела сжигаемых паров горючего, и потому при пуске горелок этого типа необходимо предварительно разогреть чугунные чаши (колосники). Испарение происходит далеко неполное. Составные части с высокой температурой кипения накапливаются в чашах и разлагаются с выделением углерода, чаши постепенно загрязняются коксом и нуждаются в регулярной очистке.

Управлять процессом горения в таких топках затруднительно. При растопке печь сильно коптит, и потому этот тип топок не получил распространения. Бесспорным преимуществом является простота устройства, не требующего для эксплуатации воздушного дутья, пара и механической энергии. Поэтому колосники Нобеля и тому подобные устройства находят применение в небольших печах, с неотвратимым режимом работы или в условиях, когда нет возможности оборудовать печь с более совершенной топочной установкой; в таком случае экономия в расходе топлива отступает на второй план.

В капельниковых топках, как видно из рис. 57, капли нефти или мазута попадают из одной или нескольких трубок в вертикальный канал навстречу горячему воздуху, превращаются в пары и сгорают. При достаточно длинном пути падения капли, небольших ее размерах и высокой температуре встречного потока воздуха (600° С и выше).

можно получить полное испарение и сжигание топлива без остатков (кокса).

Если капельная горелка работает на холодном воздухе, например при растопке печей, когда воздушные регенераторы или рекуператоры еще не разогрелись, горение проходит весьма несовершенно, печь работает с большим недожогом (копотью) и образованием кокса на дне вертикального канала. Процесс испарения крупных капель, имеющих небольшую удельную поверхность, и горение постепенно образующихся паров протекает, в отличие от распыленной нефти, гораздо медленнее, поэтому на капельниковых топках легче получить длинный факел пламени, чем при пользовании форсунками. Во многих керамических печах стремятся получить замедление процесса горения (и соответствующее удлинение факела пламени) с окончанием реакции непосредственно между обжигаемыми изделиями, чем достигается более равномерный нагрев по всем участкам печной камеры.

Поэтому в некоторых керамических печах непрерывного действия, где не требуется сжигания больших количеств топлива и обеспечена непрерывная подача горячего воздуха, капельниковые горелки могут получить применение, вследствие простоты устройства и обслуживания. В печах периодического действия топки этого типа работают плохо и потому не получили распространения.

В литературе имеются описания ряда более сложных устройств, работающих по принципу испарения жидкого топлива (без предварительного распыления) и обеспечивающих более или менее регулярное и равномерное получение нефтяного газа и хорошее его смешение с воздухом. Однако, эти устройства уступают в работе форсунками и, будучи в то же время достаточно сложными по устройству (по сравнению с капельниковыми топками), вряд ли могут найти применение к керамической промышленности.

Распыление жидкого топлива с помощью форсунок разных конструкций дает возможность проводить его сжигание с большим удобством и широким регулированием протекающих процессов.

Распыление нефти или мазута имеет целью увеличить поверхность жидкости и ускорить ее испарение, а также распределить, по возможности равномерно, капельки горючего в воздушном потоке, с целью обеспечения более быстрого последующего смешения получаемых паров с воздухом. Испарение распыленного топлива происходит под действием лучистой теплоты, получаемой от стенок топочной камеры и сгорания уже газифицированных смежных капель, почему не представляется возможным территориально разграничить эти два процесса. Низкокипящие фракции испаряются и сгорают в первую очередь, и получающимся при этом теплом обеспечивают испарение и сжигание частиц с более высокими точками кипения. Чем больше содержание фракций с низкими температурами кипения и чем мельче распыляется топливо, тем быстрее протекает испарение, смешение газов с воздухом и горение и тем короче при остальных равных условиях факел пламени и выше температура топочных газов.

Пламя распространяется с определенной скоростью, зависящей от состава горючей смеси (пары нефти или мазута + воздух). По мере

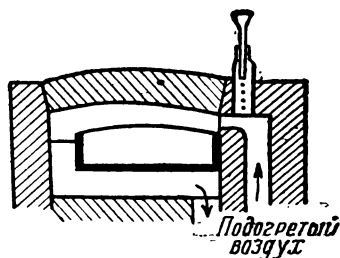


Рис. 57. Капельники для сжигания жидкого топлива

приближения к печной камере, воздух со взвешенными частицами топлива становится все богаче парами горючего, и скорость распространения пламени во внутрь факела возрастает. Воздушный поток, несущий сначала мелкие капельки, а потом и горючие газы, по мере прохождения в топочную камеру расширяется с уменьшением скорости. Граница, на которой происходит зажигание смеси, определяется

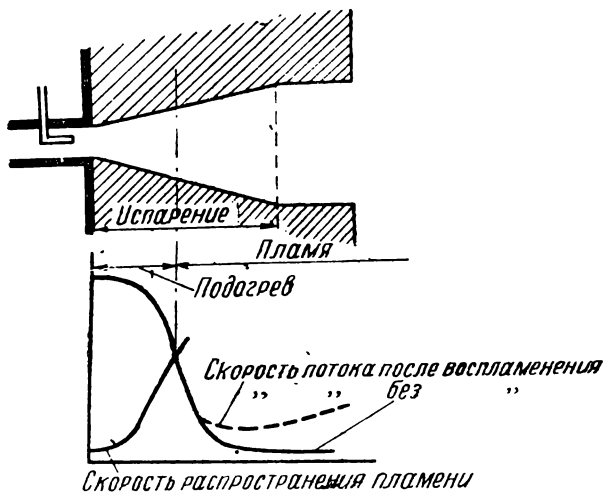


Рис. 58. Схема процесса испарения и горения жидкого топлива

соотношением скоростей движения паровоздушной смеси и распространения в ней пламени.

Пламя проникает в газовый поток до участков, где скорость его распространения равна скорости встречного движения газов. Эта зависимость наглядно показана на схематической диаграмме (рис. 58), где даны кривые скоростей и подразделение нефтяной топки для жидкого топлива на отдельные зоны в соответствии с протекающими

в ней процессами. Отмеченное на схеме соотношение скоростей для каждой топки зависит от конструкции форсунки, свойств горючего, температуры и давления воздуха, а также от размеров и формы топочной камеры, которыми определяется обратная отдача тепла лучеиспусканием от раскаленных стен.

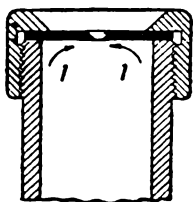


Рис. 59. Распыление жидкого топлива насадкой с острыми кромками

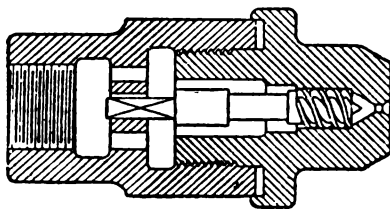


Рис. 60. Распыление жидкого топлива винтовой насадкой

Распыление жидкого топлива требует механической работы на преодоление сил сцепления. При нагревании сцепление настиг уменьшается. Поэтому вязкие сорта жидкого топлива, как парафинистый мазут, каменноугольная смола и др., перед распылением подогреваются для облегчения пульверизации, а также для подвода к топкам по трубопроводам. В зависимости от вязкости топлива и температуры вспышки, температура подогрева, обычно, колеблется в пределах 50—80° С.

Для разделения частиц жидкого топлива на мельчайшие капли применяются два основных метода: 1) распыление струи топлива, подаваемой в топочную камеру под давлением с большой скоростью, и 2) распыление посредством струи воздуха или пара, протекающих над поверхностью жидкости с большой скоростью и увлекающих отдельные частицы в топочную камеру. Кроме того, имеется целый ряд комбинированных устройств, совмещающих в той или иной мере оба метода распыления. Первый способ называется механическим распылением и имеет в своей основе элементы второго способа, поскольку движущаяся струя распыляется сопротивлением окружающей атмосферы, стремящейся оторвать наружные частицы жидкости. Кроме того, в конструкции механических распылителей предусматривается устройство винтообразных, сетчатых и других направляющих, имеющих целью придать выбрасываемой струе жидкого топлива центробежные силы, разделяющие ее на мельчайшие капельки.

На рис. 59 и 60 показаны два типа наконечников распылителей. В первом нефть или мазут поступает в направлении стрелок к выходному отверстию (соплу), имеющему остро срезанные кромки, которыми облегчается расширение и распыление струи по выходе из сопла. Второй тип форсунки имеет сердечник с винтовыми направляющими канавками. При подогреве жидкого топлива под давлением процесс испарения задерживается до тех пор, пока нагрев не будет вызывать давление паров более высокое, чем давление нагнетаемой жидкости.

Таким образом, при подогреве нефти или мазута под давлением и понижении давления на жидкость после ее выхода из распылителя происходит интенсивное испарение жидкости (вскипание), также способствующее ее распылению на мельчайшие капли. Отмеченные три основных фактора — сопротивление воздушной среды, центробежные силы, возникающие в отдельных частицах горючего, и его вскипание при понижении давления — положены в основу разнообразных систем механических распылителей.

## 2. Механические форсунки

Большое распространение в котельных и печных установках СССР получили механические форсунки системы Бабкок и Вилькокс, Оргэнерго, Григорьева, форсунки „Атом“ и некоторые другие, в которых топливо подается под высоким давлением. Механическая форсунка Оргэнерго имеет приспособление для регулирования производительности.

Форсунка состоит из трубы, с которой через тройник соединяется штуцер с сальником и регулирующим стержнем. Регулирующий стержень оканчивается насадкой с винтовыми канавками; проворачиванием маховичка он может выдвигаться вперед к наконечнику или назад. Приближая насадку к наконечнику, можно, в известных пределах, уменьшить производительность форсунки и, наоборот, удаляя насадку, — увеличить зазор и подачу нефти в толку. При равномерном сжигании топлива применяются форсунки с постоянной подачей более простого устройства.

Механические форсунки, работающие по принципу подачи нефти или мазута под давлением, дают бесшумное горение и 8—10% экономии топлива по сравнению с паровыми форсунками.

По данным Оргэнерго, механические форсунки описанного типа имеют следующую характеристику:

Размеры Механические форсунки, без регулирования (в дюйм.)	Производи- тельность в 1 час (в кг)
$\frac{1}{4}$	от 15 до 80
$\frac{3}{8}$	„ 50 „ 150
$\frac{1}{2}$	„ 150 „ 1000
Механические форсунки с регу- лированием производительности	
№ 1	до 100
№ 2	„ 160
№ 3	„ 350

Форсунки системы Котляренко (рис. 61) изготавливаются с револьверной головкой, имеющей распылители разной производительности. По ходу работы топки, когда приходится, как например в печах

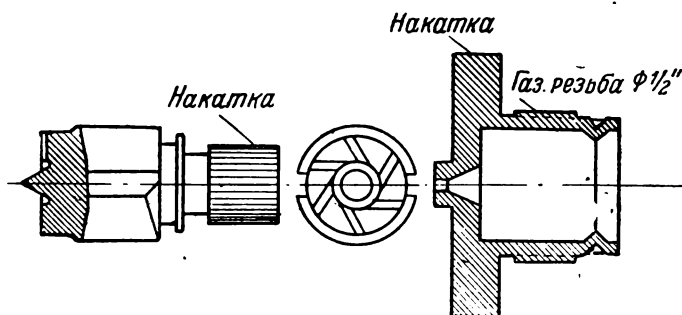


Рис. 61. Форсунка Котляренко

периодического действия, изменять производительность форсунки, поворотом головки включают в работу тот или иной распылитель. Все механические форсунки дают широкий факел пламени.

### 3. Воздушные и паровые форсунки

Воздушные и паровые форсунки, применяемые в керамической промышленности, можно подразделить на три основных типа, в соответствии с применяемым методом распыления:

- 1) форсунки с низким давлением воздуха, до 0,1 ат; преобладающее давление до 50 мм вод. ст.;
- 2) форсунки среднего давления, в которых распыление производится при давлении воздуха от 0,1 до 1 ат;
- 3) форсунки высокого давления, работающие сжатым воздухом с давлением от 1 до 7 ат.

Распыление нефти или мазута с помощью пара или воздуха основано на измельчающем (дробящем) действии паровой или воздушной струи, пронзающей с большой скоростью над поверхностью жидкости. Кроме того, распылению весьма благоприятствует расширение воздуха или пара, разделяющего частицы жидкого топлива после выхода из сопла, и резкое снижение давления.

В заводской практике нашли применение форсунки как низкого, так и среднего давления.



В паровых форсунках вместо пара можно производить распыление сжатым воздухом и, наоборот, форсунки, работающие на воздухе, можно переводить на паровое распыление, однако, при этом необходимо учитывать влияние воздуха и пара на процесс сжигания топлива.

Воздух, используемый на распыление, идет в дальнейшем на сжигание топлива и потому колебания его расхода в форсунке, как правило, не выходящие за пределы теоретически необходимого воздуха, не имеют крупного значения в эксплуатации топок и печей. Пар, израсходованный на распыление, является балластом, снижающим температуру горения топлива и коэффициент полезного действия топки. Поэтому расход пара должен быть сведен до минимума. Это обстоятельство требует тщательного выполнения паровых форсунок и хорошего наблюдения за их регулировкой в эксплуатации.

Паровые форсунки получили наибольшее применение в топках паровых котлов, где легко использовать имеющийся под рукой пар. В промышленных печах применяются форсунки, работающие, главным

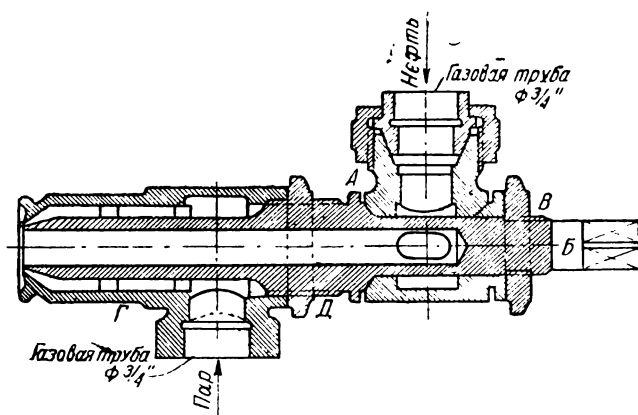


Рис. 62. Форсунка Шухова

образом, с помощью воздуха низкого, среднего и высокого давлений, получаемого от вентиляторов и воздуходувок специальных конструкций.

В паровых и воздушных форсунках высокого давления распыление может производиться либо в один прием непосредственно у выходного отверстия форсунки, подающей горючее в топочную камеру, либо процесс распыления подразделяется на две фазы: предварительное распыление в камере, образованной наружной трубой форсунки, с частичным снижением давления, и окончательное распыление взвешенных капель горючего после выхода из сопла, с падением давления воздуха до атмосферного.

Примером форсунок первой группы является форсунка системы Шухова (рис. 62), имеющая большое распространение в СССР.

Мазут подается в эту форсунку в деталь *А*, проходит внутри ее и через продолговатое отверстие в шпинделе *Б* протекает внутрь последнего. Пройдя по центральному каналу шпинделя к выходному отверстию форсунки, мазут выходит наружу. Никакого насоса для подачи мазута к форсунке не требуется; вполне достаточно пустить его самотеком, поставив напорный расходный бак на высоте около 5 м над уровнем установки форсунки. Муфта *А* свободно насажи-

вается на центральный шпindelь *Б* и далее прижимается двойным конусом и контргайкой *В*. Пар вводится ближе к концевой части форсунки через наружную трубу (корпус), проходит по кольцевому пространству между муфтой *Г* и шпинделем, подходит к кольцевой щели, образуемой этими двумя деталями у выходного отверстия форсунки, и тонким кольцевым веером со скоростью выходит наружу.

Вытекающий из форсунки мазут подхватывается паровой струей и превращается в тончайшую пыль. Распыление происходит не внутри форсунки, а вне ее, уже в самой топке.

Шпindelь форсунки можно передвигать вдоль ее оси. При этом будет меняться величина выходной щели для пара и, следовательно, при всех прочих равных условиях будет меняться количество вытекающего из форсунки пара.

Следует работать с наименьшей величиной паровой щели, так как при широких паровых щелях большая часть пара просто пропадает, проходя мимо струи мазута, не производя полезной работы распыления и излишне охлаждая топку. Если по условиям работы

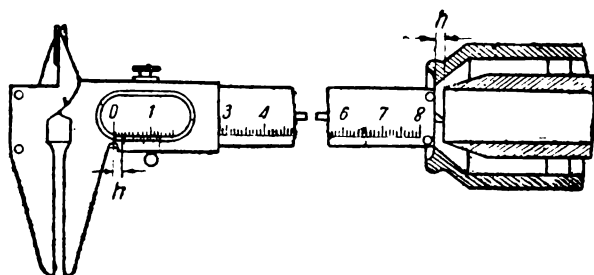


Рис. 63. Измерение щели паровой форсунки

надо прибавить пара для улучшения распыления, уничтожения дымления или при увеличении нагрузки, то правильнее всего увеличить (если это возможно) давление пара перед форсункой открытием вентиля на паровой линии, а не увеличивать паровую щель. Только в тех случаях, когда давления пара не хватает, приходится увеличить паровую щель, оттянув для этого шпindelь несколько назад. Нужно также сказать, что перестановка шпинделя — кропотливая работа, так как приходится ослаблять обе контргайки на шпинделе и после его перестановки снова их подтягивать.

Для точной регулировки размера паровой щели, при перестановке шпинделя приходится форсунку выводить из топки, что требует дополнительного времени для настройки ее работы при изменении расхода топлива.

Сделать непосредственный замер самой паровой щели очень трудно. Имеется, однако, полная возможность замерить другую величину, которая в достаточной степени определяет величину паровой щели. Такой замер показан на рис. 63. Он производится штангенциркулем. Как нетрудно видеть (см. также рис. 62), измеряется расстояние вдоль оси форсунки между передней кромкой муфты *Г* и концом шпинделя *Б*. Это расстояние, которое можно называть условной паровой щелью, во всяком случае не должно быть больше 1 мм. Опыты Теплотехнического института показали, что при уменьшении паровой щели от 1 до 0,6 мм удается снизить расход пара на распыливание, примерно, на 25%. Во всяком случае, всегда необходимо перед установкой форсунки замерять величину паровой щели.

Из рис. 63 видно, что на шпинделе форсунки имеется два ряда выступов-зубцов, служащих для того, чтобы шпindelь сидел центрально внутри муфты *Г* (см. рис. 62). На центральность установки

шпинделя внутри муфты необходимо обращать самое серьезное внимание, так как если шпindelь стоит косо, то пар вытекает из форсунки неравномерно, по длине паровой щели, и форсунка работает неэкономично. Следует еще указать, что форсунки Шухова изготовляются разных размеров, разных номеров, соответственно различным производительностям форсунки. Как правило, малые номера паровых форсунок работают более экономно, чем большие. Поэтому следует всегда выбирать форсунку Шухова наименьшего возможного размера, конечно, при том условии, чтобы она дала нужную производительность.

Необходимо отметить, что существующие нормы расхода мазута не всегда верны; так, например, форсунка Шухова № 3 по норме должна дать 80 кг мазута в час, практически же она свободно пропускает 220 кг.

В эксплуатации форсунки Шухова работают вполне надежно. Экономичность их при правильной работе, по сравнению с другими паровыми форсунками, вполне удовлетворительна.

Существует целый ряд систем и конструкций форсунок этого типа, имеющих некоторые, часто несущественные, особенности, направленные к обеспечению

достаточно тонкого распыления и сокращения расхода пара на 1 кг сжигаемого топлива. В некоторых конструкциях, описанных в американской литературе, применяется три трубы (сопла), входящие одна в другую и образующие центральное отверстие и две концентрические щели. Воздух или пар подается в наружную кольцевую щель и через центральное отверстие, а мазут — через внутреннюю кольцевую щель. Таким образом, тонкая пленка стекающего из щели горючего подхватывается с двух сторон быстрыми потоками воздуха или пара и превращается в тонкую пыль. Недостатком этого устройства является сложность двойной регулировки ширины щелей путем перемещения вдоль оси двух внутренних трубок.

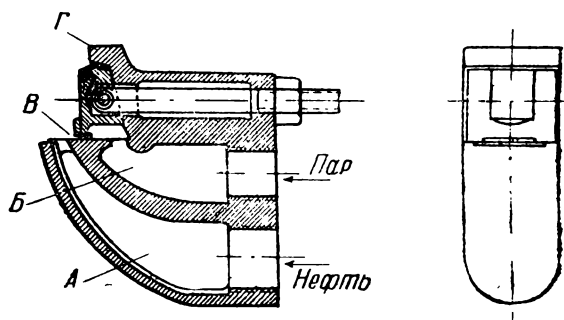


Рис. 64. Форсунка системы Бест

Все форсунки с круглыми соплами дают соответственный факел, имеющий сечение, приближающееся к форме круга. В некоторых печах (например, в нижних горелках туннельных горнов) необходимо бывает получить при сжигании жидкого топлива плоское пламя. Для этого целесообразно применять специальные форсунки, дающие плоское веерообразное пламя, например системы Бест (рис. 64), Геншке и др. Форсунка системы Бест, широко известная в США, имеет простую конструкцию и дает при распылении воздухом или паром среднего давления широкое короткое пламя. В этой форсунке мазут подается в нижнюю ее часть, в канал, обозначенные буквой А, и поднимается вверх к выходному отверстию.

Пар подается в верхнюю полость В, также поднимается несколько вверх и с силой вылетает из паровой щели В. Принцип действия форсунки Бест достаточно прост и заключается в том, что

выбывающий из щели *B* пар смывает поднимающийся через полость *A* мазут и распыливает его.

По экономичности форсунка Бест является одной из лучших. Регулирование воздушной щели производится путем поджима гайки регулировочного болта, прижимающего деталь *Г* к нижней плоскости корпуса форсунки.

Воздушная форсунка типа, рекомендуемого Оргэнерго имеет очень простую конструкцию и расходует на распыление около 10—10,5 м<sup>3</sup> воздуха на 1 кг нефти при давлении в 200—500 мм вод. ст. Остальной воздух, необходимый для полного сжигания топлива, инжектируется воздушной струей, выходящей из форсунки.

Воздушные форсунки, в зависимости от их размеров и эксплуатационных условий, имеют, по данным Оргэнерго, показатели работы, приведенные в таблице 42.

Таблица 42

Тип форсунки	Диаметр сопла в мм	Давление воздуха 200 мм вод. ст.		Давление воздуха 350 мм вод. ст.		Диаметр подводящего нефтепровода в дюйм.	Диаметр нефтяной трубки в дюйм.	Диаметр воздухопровода в мм
		расход мазута в кг/час	расход воздуха в форсунке в м <sup>3</sup> /час	расход мазута в кг/час	расход воздуха в форсунке в м <sup>3</sup> /час			
о—6/1	20	5	55	7,5	75	1/2	3/8	62
о—6/1	30	10	105	16	160	1/2	1/2	62
о—6/2	40	20	210	30	300	1/2	1/2	100
о—6/3	50	32	340	45	450	1/2	1/2	125
о—6/4	60	46	490	63	630	1/2	3/4	140
о—6/4	65	52	550	73	730	3/4	3/4	140

Второй тип паровых и воздушных форсунок высокого давления имеет внутреннюю полость, где происходит предварительное распыление горючего внутри корпуса *1* самой форсунки. Как видно из

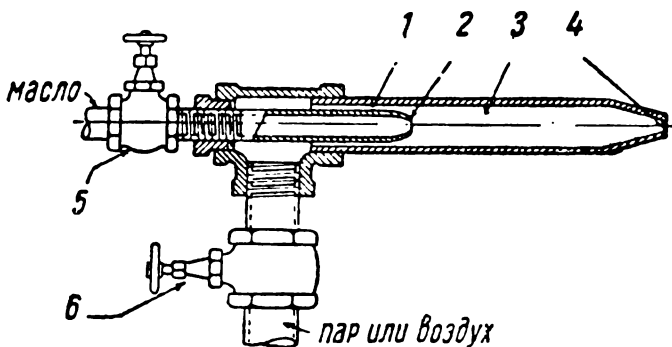


Рис. 65. Воздушная форсунка среднего давления

схемы, показанной на рис. 65, жидкое топливо подается по центральной трубке через сопло *2* в полость *3*. Пар или сжатый воздух через кольцевую щель также проходит в полость *3* и путем инжекции увлекает и частично распыляет нефть или мазут, поступающие через

центральную трубку. В полости 3 давление воздуха понижается, но все же остается значительно выше атмосферного, и получающаяся смесь воздуха и капель горючего подается через выходное сопло 4 форсунки в топочную камеру, где давление падает до атмосферного и где заканчивается процесс распыления топлива. Работа распылителей этого типа зависит от тщательности проработки конструкции и точности изготовления распылителя. В хорошем исполнении форсунки этого типа работают удовлетворительно. Наилучшие результаты получаются при работе на подогретом воздухе, если по условиям производства использование горячего воздуха и получающиеся при этом весьма высокие температуры горения не вызывают осложнений.

На рис. 66 изображена форсунка низкого давления с внутренним распылением, в которой распыление сперва получается в результате механического действия нефтяного сопла, через которое нефть подается под давлением от 5 до 10 кг/см<sup>2</sup> (от 75 до 150 фунт./дюйм), а затем ударом воздуха о нефтяную струю, выходящую из сопла. Ввиду сравнительно небольших отверстий в нефтяной насадке, эта форсунка подходит, преимущественно, для чистых сортов нефтетоплива с низкой вязкостью.

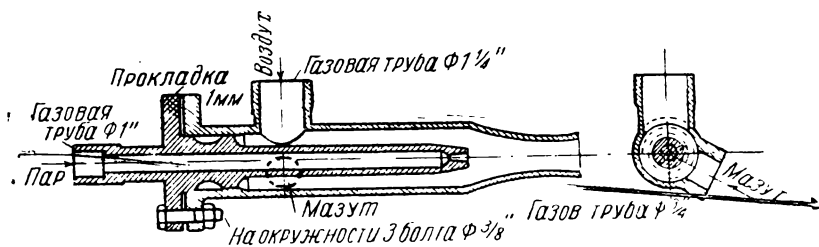


Рис. 66. Форсунка с внутренним распылением

С таким топливом форсунка дает короткое чистое пламя, весьма схожее с пламенем, получаемым при сжигании натурального газа в хорошей горелке.

Работа форсунок с предварительным распылением во внутренней их полости требует точного регулирования подачи воздуха и горючего и обеспечения постоянного давления в смесительной камере порядка 2—2,5 ат.

Регулирование должно производиться чувствительными вентилями. Трубопроводы должны иметь достаточные сечения, обеспечивающие чувствительную регулировку подачи воздуха и горючего. Этот тип форсунок дает недостаточно равномерное тонкое распыление и более длинное и светящееся пламя.

Для обжига керамических изделий длинный светящийся факел пламени является желательным при условии догорания топлива в распыленной насадке из обжигаемых изделий, за счет горючего воздуха, так как позволяет получить более равномерную температуру обжига по всем сечениям камеры; поэтому горелки этого типа могут применяться в керамических печах с нефтяным отоплением. Выбор способа распыления и давления применяемого для этой цели пара или воздуха определяется требованиями технологического порядка, предъявляемыми к источнику нагревания топки, а также и местными условиями.

На керамических заводах пар как источник механической энергии и теплоноситель в сушильных установках постепенно уступает свое место электроэнергии и горячему воздуху, получаемому в больших количествах при охлаждении выходящей из обжига продукции. В связи с этим, а также ввиду недостаточной экономичности паровых форсунок, они имеют в керамических производствах очень ограниченное применение. Их применяют, например, в начальный период обжига в печах периодического действия, когда более резкий и короткий факел пламени, получаемый при пользовании воздушными и механическими форсунками, мог бы повлечь быстрый и неравномерный нагрев сырца и вызвать связанные с этим дефекты продукции.

В печах непрерывного действия (туннельных), где методический нагрев обеспечен самим принципом работы печей, получили преимуще-

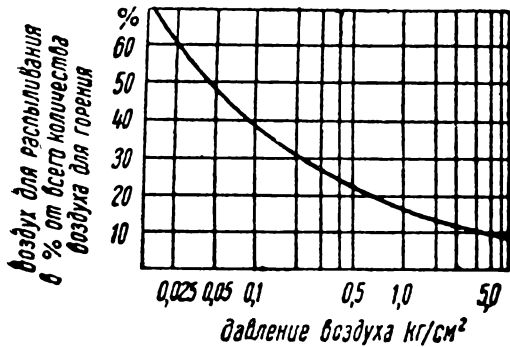


Рис. 67. Диаграмма расхода воздуха на распыление в зависимости от давления

ственное распространение воздушные и механические распылители. Воздух высокого давления, как распыляющее средство, имеет преимущество в смысле его расходования, по сравнению с воздухом низкого давления. Форсунки высокого давления расходуют на распыление около 10% воздуха, теоретически необходимого для сжигания топлива, причем остальные 90% воздуха могут быть введены в разных участках подогрева, что обеспечи-

вает большие регулировочные возможности, как в части длины факела пламени, так и в отношении смещения фокуса горения (зоны наиболее высоких температур). Форсунки низкого давления расходуют на распыление 50—70% воздуха, необходимого для сжигания топлива, и, таким образом, лишь 50—30% воздуха может подаваться из рекуператоров, регенераторов или зоны охлаждения в подогретом виде.

Расход воздуха на распыление зависит не только от его давления, но и от вязкости топлива, температуры подогрева, конструкции распылителя, давления в топливном трубопроводе и других обстоятельств.

По Тринксу, минимальный расход воздуха на распыление определяется в зависимости от его давления диаграммой, показанной на рис. 67.

#### 4. Топочные камеры для жидкого топлива

Работа нефтяной топки в значительной степени определяется установкой форсунки и устройством огневой топочной камеры. Струя нефти направляется в топку через коробку форсунки таким образом, чтобы расширение коробки фактически соответствовало форме разбрызгиваемой струи. Сама огневая камера должна конструироваться так, чтобы раскаленная поверхность получалась вблизи насадки форсунки и облегчалось сгорание. Топочная камера должна иметь постепенно возрастающее поперечное сечение и минимальное

сопротивление струе непрерывно расширяющихся газов, выходящих из топочной камеры.

В керамических печах в одной топке сжигается, обычно, не более 40 кг/час жидкого топлива, и потому топочная камера должна быть, в силу необходимости, сравнительно небольшой. Обычно, объем ее составляет от 0,2 до 0,5 м<sup>3</sup> на сожженный за 1 час 1 кг топлива. Меньшие значения выбираются, когда требуется длительный период прокурки и низкая конечная температура. Небольшая топочная камера нагревается гораздо скорее и дает хорошее сгорание гораздо быстрее, чем это можно получить в большой камере. С другой стороны, маленькая камера прогорает гораздо быстрее, чем большая, в особенности, если сгорание заканчивается в самой камере.

Там, где для обжига изделий требуются длительный период прокурки (удаление влаги из изделий) и высокая конечная температура, принято устанавливать форсунку таким образом, чтобы ее можно было поворачивать. Во время прокурки форсунка устанавливается так, чтобы пламя ударялось в под огневой камеры, благодаря чему облегчается сгорание нефти. По мере усиления горения и разогрева огневой камеры, форсунку поворачивают так, чтобы струя не касалась пода. Если при более высоком напряжении топки и высоких температурах, струя пламени будет задевать огневую камеру, это может вызвать образование перед форсункой кокса.

Взамен поворачивающихся форсунок применяют кирпич, поставленный ребром перед форсункой с тем, чтобы при начале горения струя разбивалась о него. Когда огневая камера накаливается докрасна, кирпич, обычно, вытаскивается.

При оборудовании керамических печей нефтяными топками топочная камера становится неотъемлемой частью печи и должна строиться так, чтобы она отвечала требованиям обжига заданной продукции.

Нефтяная (и мазутная) топка для фарфорового горна (рис. 68) имеет следующие основные части: головку топки, оборудованную воздушной форсункой 1 низкого давления (150—200 мм вод. ст.), рабочую камеру 2 и для более равномерного распределения пламени — решетку 3. Величина отверстия решетки регулируется, по мере надобности, путем закладки кирпичами. Как рабочая камера, так и решетка, выкладываются из динасового кирпича, который служит без ремонта около года. Регулировка форсунки производится изменением подачи воздуха и нефти через форсунку. Описанными топками оборудованы горны изоляторных заводов Изолятор, им. Артема, Пролетарий и плиточный завод им. Булганина.

Воздухоподводящая и нефтяная (мазутная) трубы смонтированы на шарнирных соединениях 4, позволяющих быстро выводить форсунку из топочной камеры для осмотра, чистки или замены.

Когда приходится переоборудовать старую печь с топками для твердого топлива на отопление нефтью или мазутом, то следует использовать те же принципы конструкции. Огневая камера должна быть полностью перестроена и выложена первосортным огнеупорным кирпичом.

Чтобы избежать просачивания нежелательного излишнего воздуха, передняя часть топочной камеры должна быть закрыта, особенно тогда, когда применяются форсунки низкого давления с воздушными распылителями.

Если в топках для сжигания твердого топлива применялась изоляция, то при переустройстве топок на нефтяное отопление ее

нужно удалить с тех мест, где она окружает топочную камеру, чтобы облегчить передачу тепла от раскаленной футеровки через кирпичную кладку и увеличить срок службы топки. Не следует оставлять ни одного красного кирпича в футеровке собственно огневой камеры.

Лучше всего вокруг топочных камер пользоваться сплошной кладкой из огнеупорного кирпича.

При обжиге керамических изделий на жидком топливе, дающем высокие температуры, становится возможным применение топок с рециркуляцией печных газов. По литературным данным, нефтяные топки с рециркуляцией начинают внедряться в керамической промышленности и могут дать экономию в расходе топлива и улучше-

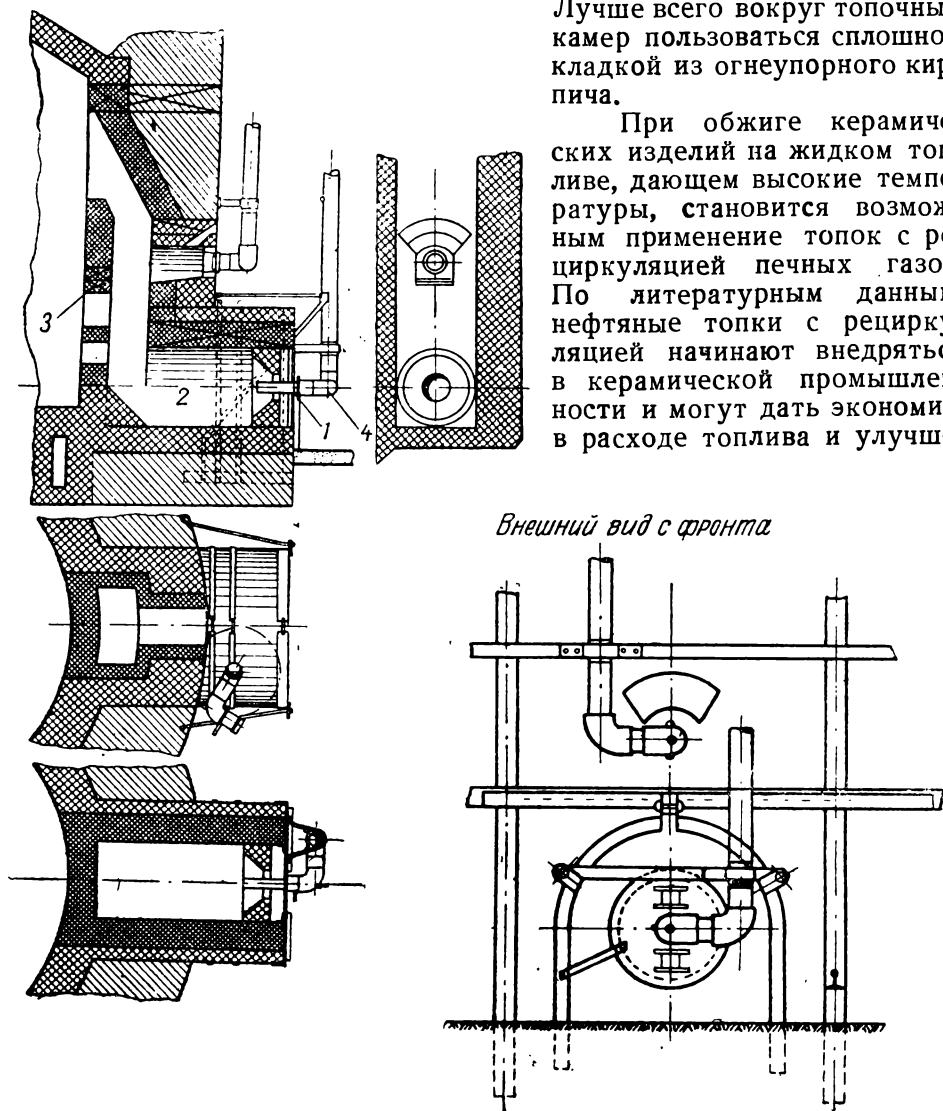


Рис. 68. Топка фарфорового горна для обжига мазутом

ние качества изделий, благодаря даваемой ими большей равномерности обжига, по сравнению с обычными топками.

Имеются конструкции топочных камер, в которых используется вторичная циркуляция газов в печи, а струя форсунки действует в качестве инжектора. Форсунка устроена так, чтобы нагревать печь через экран, применяемый для повторной циркуляции и расположенный на расстоянии от 8 до 15 см от насадки форсунки; расстояние это зависит от работы форсунки и газообмена требующейся повтор-



ной циркуляции. При давлении распыляющего воздуха, равном 0,15 ат, и отношении повторной циркуляции к объему газов от сжигания топлива, равном 1:1, указанное расстояние равняется около 10 см. Пространство между экраном для повторной циркуляции и передней частью форсунки соединяется с каналом для отвода топочных газов, ведущим к дымовой трубе. Подсасываемые форсункой газы увлекаются из отводного бора и возвращаются в топочную камеру.

Вокруг самой форсунки оставляется небольшое отверстие для охлаждения ее корпуса втягиваемым атмосферным воздухом. Этот воздух вместе с воздухом, проходящим сквозь форсунку, создает охлаждение последней, достаточное для того, чтобы форсунка не прогорала.

При повторной циркуляции воздух в топочной камере смешивается с продуктами горения, и горение происходит значительно медленнее, чем в тех топках, где повторная циркуляция не применяется. Дабы избежать неполного сгорания, весь воздух пропускается через форсунку и тщательно смешивается с топливом, прежде чем последнее входит в топочную камеру.

Общая конструкция самой топочной камеры с повторной циркуляцией образующихся при горении газов, совершенно отлична от конструкции топочных камер для непосредственного отопления нефтью. Поскольку желательно получить тщательное перемешивание свежих и подвергающихся вторичной циркуляции продуктов горения, в топке не устраивается покатое дно. Передняя часть камеры находится вне огневой зоны. Поэтому над сводом можно применять изоляцию для сохранения тепла газов, подвергающихся вторичной циркуляции.

Повторная циркуляция продуктов горения в периодических печах для обжига является нововведением, которое обещает хорошие результаты. В периоды прокуривания повторная циркуляция дает гораздо более мягкое и постепенное удаление влаги, предотвращая затвердевание верхнего покрова изделий, наиболее близких к топочным камерам, и оседание влаги в более удаленных рядах. Во время обжига и, в особенности, перед его окончанием, повторная циркуляция способствует выравниванию температуры по всей печи.

Повторная циркуляция дает значительную экономию топлива, употребляемого для обжига изделий. При повторной циркуляции требуется расходование топлива лишь для нагрева продуктов горения от температуры отработавших продуктов горения лишь до температуры на 50—150° выше температуры изделий. В надлежащим образом отапливаемой печи разница между этими двумя температурами редко превышает 250—300° С. Если используются лишь свежие продукты сгорания, то для горения берется холодный воздух, который приходится нагревать до рабочей температуры, т. е. на число градусов примерно в пять раз большее, чем в случае повторной циркуляции.

Повторная циркуляция газов в периодических печах пока еще недостаточно разработана. Насадки форсунок, несмотря на двойное охлаждение, часто перегорают, даже если они сделаны из высокоогнеупорных материалов. Охлаждение насадок водой, которое теперь пробуют применять, возможно, устранил это затруднение. Каналы для рециркуляции дымовых газов должны быть чистыми, так как в противном случае увеличивается сопротивление прохождению газов.

Форсунка с повторной циркуляцией должна работать при более высоком давлении, чем форсунки без повторной циркуляции; при

этом форсунка должна пропускать весь воздух, что увеличивает на 100—150% расход энергии для распыления нефти. Однако, несмотря на отрицательные моменты в работе форсунок, повторная циркуляция даже в настоящее время дает достаточно хорошие результаты, в особенности в новых печах, в которых под и дымоходы могут быть надлежащим образом выложены при их постройке.

Конструирование нефтяных и мазутных топок для керамических печей является довольно сложной задачей. Даже фирмы, имеющие большой опыт в постройке керамических печей, не свободны от ошибок в этой области. Примером может служить конструкция мазутных топок туннельной печи изоляторного завода „Пролетарий“.

Распыление мазута в этих топках производится воздушными форсунками среднего давления. Расход воздуха на распыление топлива, по проекту, составляет, примерно, 30% от его количества, необходимого для полного сжигания топлива. По проекту печи (составленному фирмой Дресслер), остальной воздух должен был подаваться горячим из зоны охлаждения туннеля.

Получающаяся в топках при нагретом воздухе температура факела оказалась губительной для диасовой футеровки топок, и они начали, одна за другой, выходить из строя. В качестве мероприятия для сохранения топок, в них стали подавать взамен горячего холодный воздух из помещения цеха. Это было достигнуто путем незначительной переделки в воздушном инжекторе. Кроме того, диасовая футеровка была заменена импортной шамотной. Однако, эти мероприятия оказались недостаточными, и новая футеровка простояла всего 10—15 дней.

Дальнейшие мероприятия были направлены в сторону конструктивного изменения размеров топочной камеры (уменьшения длины и увеличения высоты от 150 до 250 м). Топки новой конструкции показали более продолжительную службу и работают удовлетворительно, однако, проблема сжигания мазута в щелевых топках с малым объемом остается и в настоящее время еще недостаточно изученной.

Применение низких щелевых топок для сжигания мазута в туннельной печи фирмы Дресслер вызвано вполне логичным стремлением подать пламя в нижнюю часть вагонетки между колонок, на которых устанавливаются капсулы с обжигаемым фарфором. Обычным недостатком работы туннельных печей при всех их бесспорных положительных качествах является более низкий нагрев нижних рядов капсул. Поэтому концентрированная подача пламени довольно хорошо разрешает задачу выравнивания температур обжига по высоте загрузки вагонеток. Кроме того, подача острого пламени на массивный и более устойчивый огнеупорный припас шамотных подставок и перекрывающих плит, устраняет деформацию менее выносливых капсул и обжигаемой продукции из-за местных перегревов.

Получающиеся при этом преимущества обжига продукции на вагонетке теряют свое значение в силу крайне быстрого износа футеровки топок, сжимающих факел в узком сечении.

В качестве мероприятий, имеющих целью обеспечить более продолжительную службу футеровки топок, намечаются: 1) задержка процесса горения и 2) получение длинного факела пламени.

Задержка горения может осуществляться за счет менее совершенного распыления горючего, но при этом необходимо учитывать опасность образования нефтяного кокса и необходимость частой очистки топочных устройств. Снижение температуры пламени за счет

больших избытков воздуха в керамических печах не применяется в виду крайней невыгодности этого приема.

В некоторых печах может оказаться технически целесообразным недостаточное питание топки воздухом при подаче пламени в раскаленную загрузку печи и обеспечении в ней благоприятных условий для дожига газов.

В непрерывно действующих туннельных и кольцевых печах пламя подается в предварительно раскаленную насадку и может догорать за счет горячего воздуха, поступающего из зоны охлаждения этих печей.

Если в туннельной печи обжигаются высоко-огнеупорные материалы, не страдающие от высоких температур, то перемещение фокуса горения в садку (загрузку вагонетки) может оказаться выгодным, ввиду уменьшения тепловых потерь топки и сокращения расходов на ее ремонт.

Однако, значительная часть керамических изделий — строительный кирпич, клинкер, фарфор, фаянс и т. п. — получают из обжига надлежащего качества лишь при нагреве ровным пламенем с температурой, которая превышает максимальную температуру нагрева изделий, примерно, на 200—400° С. Поэтому при сжигании таких видов топлива как нефть, мазут, естественный газ, пылевидное топливо, в конструкции камеры должна быть предусмотрена возможность смягчения действия языков пламени с высокой температурой на обжигаемые изделия.

Мазутные топки для печей периодического действия должны работать в еще более сложных условиях переменного режима, так как в отдельные периоды обжига к топке предъявляются разнообразные и часто противоречивые требования.

В начале обжига требуется получение в топках низких температур с большим избытком воздуха, во избежание дефектов на сырых изделиях, неизбежных при резком нагревании последних, тогда как в заключительной части обжига работа топок форсируется на их максимальную мощность.

В туннельных печах для керамических производств мазутные и нефтяные топки получили наибольшее распространение в США, где подавляющая часть этих печей отапливается жидким топливом или естественным газом. Из них топки конструкции Гарропа, работающие по принципу излучения и устраиваемые в печах этой же фирмы, отличаются простотой конструкции, не требуют частых ремонтов и дают хорошие производственные результаты.

Глубина топок рассчитана в соответствии с длиной пламени, и потому изделия не подвергаются действию языков пламени, а нагреваются, главным образом, за счет лучистой отдачи тепла пламенем и стенками топки и равномерно раскаленными продуктами горения.

Лучеиспускание топок в сторону менее нагретой обжигаемой продукции и, следовательно, невысокий нагрев кладки вместе с простотой конструкции топок Гарропа обуславливают долговечность их работы.

Широкое распространение радиационных топок этого типа в США говорит о возможности их использования и в наших туннельных печах, которые по местным условиям будут работать на мазутном или нефтяном отоплении.

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

# ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ГОРЯЧИХ ГАЗОВ ИЗДЕЛИЯМ В СУШИЛКАХ И ПЕЧАХ

### 1. Основные понятия и законы теплопередачи

Процессы, протекающие в керамическом черепке при тепловой обработке, требуют, помимо регулярного притока тепла от топочных или иных (нагревов электрическим током) устройств, еще и активно действующих теплоносителей для равномерного распределения получаемого тепла между изделиями. Вместе с тем, в фарфоро-фаянсовом производстве, в силу специальных требований к процессам обжига и сушки, применяются вспомогательные устройства, например, защитные муфельные перегородки и капсулы, гипсовые формы, которые играют в период нагрева и охлаждения изделий весьма крупную роль и определяют значительную сложность тепловых процессов. Несмотря на большую сложность процессов теплопередачи в условиях работы производственных установок, последовательный их анализ, обычно, приводит к ряду простейших зависимостей, уже достаточно изученных и проверенных на практике.

Передача тепла от одного тела к другому может происходить путем излучения тепла, теплопроводности и конвекции (тепловой циркуляции).

Процесс излучения тепла по своей природе является результатом колебательных молекулярных движений материи, передающихся на расстоянии от более нагретых тел к более холодным.

На поверхности любого твердого тела, при любой температуре, его тепло превращается в лучистую энергию, т. е. в электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве со скоростью света.

Теплопроводность внутри твердых тел обусловлена непосредственным контактом сталкивающихся молекул вещества и передачей кинетической энергии от одних молекул к другим, под влиянием разности температур.

Передача тепла путем конвекции возможна только для тел, обладающих большой подвижностью частиц, т. е. для жидкостей и газов. Конвекция вызывается расширением жидкостей или газов при нагревании, уменьшением их удельного веса и перемещением частиц под влиянием получающейся разности удельных весов.

Перемещение жидкости или газа обеспечивает непрерывный контакт между нагретыми и холодными их частицами и передачу тепла теплопроводностью. В обмене тепла конвекцией основным процессом является передача тепла теплопроводностью, ускоряемая механическим перемещением частиц под влиянием естественных потоков жидкости или газа.

### 1. Передача тепла излучением

Тепловые лучи подчиняются основным законам физики, установленным для световых лучей, а именно:

1. В однородной изотропной среде тепловые лучи распространяются прямолинейно, причем интенсивность теплового потока в направлении, перпендикулярном к поверхности излучения, обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника теплового излучения.

2. В случае излучения тепла в направлении, не перпендикулярном к поверхности излучения, интенсивность теплового потока определяется по закону Ламберта. По этому закону, интенсивность потока определяется умножением интенсивности в направлении, нормальном к излучающей поверхности, на  $\cos \angle \beta$ , образуемого нормалью к этой поверхности и принятым направлением теплового воздействия.

3. Тепловые лучи подчиняются, как и световые, законам преломления и отражения.

Количество теплоты, излучаемое нагретым до определенной температуры телом, не зависит от того, какими телами это тепло будет восприниматься или отражаться, но тепловое состояние излучающего тела зависит от температуры окружающих тел.

Например, стенки топочных вылетов горна, нагретые, допустим, до  $800^\circ$ , излучают определенное количество тепла, независимо от температуры рядом стоящих капсулей. В конечной стадии обжига, когда капсули нагреваются до  $1300^\circ$ , температура стенок будет повышаться от обратного излучения тепла капсулями.

Количество тепла, излучаемое в единицу времени единицей поверхности тела с температурой  $t$  на окружающее данную поверхность другое тело с температурой минус  $273^\circ$  (абсолютный нуль), называется излучательной способностью или калорическим излучением тела при данной температуре.

По закону Стефана-Больцмана, лучеиспускательная способность твердого тела, или полное количество тепла, излучаемое по всем направлениям  $1 \text{ м}^2$  поверхности тела, определяется формулой:

$$E = C \left( \frac{T}{100} \right)^4 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час},$$

где:  $T$  — абсолютная температура твердого тела;

$C$  — коэффициент собственного излучения, зависящий от рода тела и характера поверхности.

Большинство твердых тел имеет коэффициенты излучения, весьма отличающиеся от коэффициента излучения абсолютно черного тела.

В таблице 43 приведены данные для тел, встречающихся в практике теплового хозяйства керамических заводов.

Как видно из приведенной на стр. 142 таблицы, коэффициенты излучения некоторых тел весьма отличаются от коэффициента излучения абсолютно черного тела.

## КОЭФИЦИЕНТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Наименование тел	$C$ кал/м <sup>2</sup> ·час °С <sup>4</sup>	Температурные пределы применения в °С
Металлы:		
Железо шероховатое . . . . .	4,5	20—360
Чугун шероховатый ржавый . . . . .	4,6	40—250
Железо блестящее . . . . .	1,7	—
Цинк . . . . .	0,6	—
Медь матовая . . . . .	3,10	—
Абсолютно черное тело . . . . .	4,93	—
Строительные и другие материалы:		
Глина . . . . .	1,85	} 60
Вода . . . . .	3,2	
Известняк землистый . . . . .	1,45	} 40—250
Земля (перегной) . . . . .	1,8	
Известковая штукатурка (белая) . . . . .	4,33	—
Кирпич с шероховатой поверхностью . . . . .	4,2—4,4	—
Сажа . . . . .	4,6	—
Стекло . . . . .	4,4	—
Светящаяся поверхность твердых тел . . . . .	около 4,3	свыше 500

На рис. 69 показано графическое выражение закона излучения для абсолютно черного тела.

Как видно из диаграммы, количество излучаемой абсолютно черным телом теплоты растет с повышением температуры.

Весьма важным свойством тел, с которым приходится иметь дело при передаче тепла лучеиспусканием, является способность тел поглощать лучистую теплоту. Поглощение лучистой теплоты каким-либо телом выражается в понижении интенсивности (напряжения) теплового луча.

Кроме поглощения тепловых лучей, в тепловых установках, обычно, имеет место их отражение от гладких и шероховатых поверхностей (рассеивание). Поверхности, полностью отражающие в идеальном случае, тепловые лучи, называются зеркальными (гладкие) и белыми (шероховатые). Поверхность, которая не отражает ни одного луча, называется в тепловом смысле „абсолютно черной“.

На практике не приходится встречаться с полным поглощением лучистой теплоты; лучи теряют только часть интенсивности, передавая соответствующую часть тепловой энергии воспринимающему телу, остальная часть отражается и рассеивается.

Кроме характера поверхности, степень поглощения средой (телом) лучистой энергии зависит от длины волны теплового луча.

Быстрота нагрева обжигаемых изделий во многом зависит от их способности поглощать лучистую теплоту, т. е. от коэффициента поглощения.

Чем больше этот коэффициент, тем быстрее можно передать изделиям тепло горячих газов, тем эффективнее проходит процесс обжига.

С другой стороны, наиболее полная передача лучистой теплоты к обжигаемым изделиям имеет место при наибольшей проницаемости для тепловых лучей промежуточной среды, расположенной между

телами, излучающими и поглощающими тепло. Такой промежуточной средой являются воздух и дымовые газы.

Коэффициент поглощения чистого (без пыли) сухого воздуха можно считать приближающимся к нулю, т. е. воздух практически можно считать средой, не поглощающей лучистой теплоты, — теплопрозрачной или диатермической средой. Теплопрозрачность среды не связана с прозрачностью для световых лучей. Например, углекислый газ, совершенно прозрачный для световых лучей, поглощает лучистую теплоту.

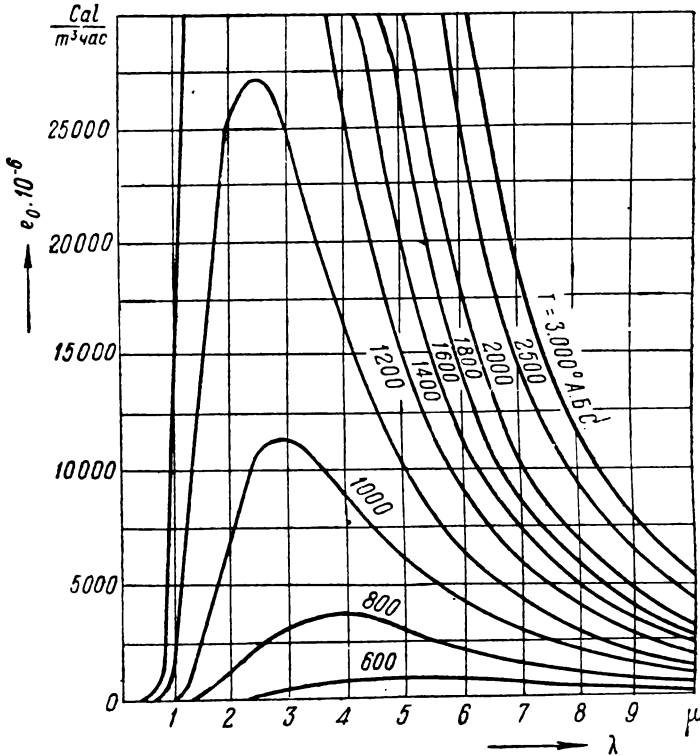


Рис. 69. Излучение абсолютно черного тела

Помимо поглощения, в ряде случаев происходит частичное отражение тепловых лучей и прохождение их через данное тело.

Сумма лучей  $I$ , падающих на тело, распределяется так:  $I = I_1 + I_2 + I_3$ , где  $I_1$  — поглощенные лучи,  $I_2$  — отраженные и  $I_3$  — пропущенные телом.

Когда все лучи поглощаются телом и слагаемые  $I_2$  и  $I_3$  обращаются в нуль, мы имеем так называемое „абсолютно черное тело“.

Когда все лучи отражаются, тогда  $I_1 = I_3 = 0$  и тело является „идеальным зеркалом“.

Когда все лучи проходят и  $I_1 = I_2 = 0$ , — тело является абсолютно прозрачным для тепловых лучей.

Поглощательная способность тела определяется длиной пути, проходимого лучом (толщина слоя вещества), и коэффициентом поглощения  $A$  данного тела для заданной длины волны.

Коэффициент поглощения  $A$  показывает, какая часть лучистой энергии поглощается данным телом. Абсолютно черное тело поглощает всю излучаемую на него энергию, следовательно, коэффициент поглощения абсолютно черного тела  $A$  равен 1.

Согласно закону Кирхгофа, существует прямая пропорциональность между коэффициентом излучения  $C$  и коэффициентом поглощения  $A$ ; а следовательно, и излучательной способностью  $E = C \left(\frac{T}{100}\right)^4$  и коэффициентом поглощения  $A$ .

Если промежуточная среда поглощает лучи только одной определенной длины волны, то такая среда обладает выборочной или так называемой „селективной“ поглощательной способностью. Дымовые газы, в состав которых входят, обычно, углекислый газ и пары воды, подобно этим своим составным частям поглощают лучистую теплоту.

Для твердых тел коэффициент поглощения лучистой теплоты почти не зависит от длины волны.

Излучение физических тел тесно связано с их поглощательной способностью. Эта зависимость определяет изменение лучеиспускательной способности параллельно с изменением поглощательной, в связи с характером и структурой поверхности тела, и ясно выражена в законе Кирхгофа.

По закону Кирхгофа, отношение лучеиспускательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от свойств самого тела и является постоянной величиной.

Если мы имеем два тела I и II, причем тело II абсолютно черное,  $E_1$  и  $E_2$  — лучеиспускательные способности обоих тел,  $A_1$  и  $A_2$  — их поглощательные способности, то закон Кирхгофа выразится в следующем виде:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2}.$$

Сопоставляя тело I со II „абсолютно черным“ телом, у которого поглощательная способность  $A_s$  равна единице, а лучеиспускательная

$$E_s = 4,9 \left(\frac{T}{100}\right)^4,$$

получим, что для всех тел природы:

$$\frac{E_1}{A_1} = 4,9 \left(\frac{T}{100}\right)^4.$$

Установление математической зависимости между лучеиспускательной и поглощательной способностью физических тел облегчает разрешение ряда вопросов, касающихся передачи тепла изделиям в процессе их сушки и обжига.

Сушка и обжиг керамических изделий, как правило, не могут осуществляться без использования газов в качестве обогревательной или промежуточной среды.

Влияние излучательной и поглощательной способности газов, входящих в состав продуктов горения, а именно, азота и кислорода, углекислого газа, окиси углерода и водяных паров, имеет большое значение в процессе обжига.

В отличие от твердых тел, дающих сплошной спектр лучей, теплоизлучение газов не дает сплошного спектра. Если данный газ излучает лучи определенной длины волны, то эти же лучи и погло-



щаются газом; остальные проходят сквозь толщу газа, не задерживаясь.

В той части спектра, где газом поглощаются лучи определенной длины волны, интенсивность излучения газа равна интенсивности излучения „черного тела“ при одинаковых температурных условиях (рис. 70).

Из основных законов излучения вытекает, что газы излучают, как черное тело, при бесконечно толстом слое. Однако, для практических приближенных расчетов излучение газа можно приравнять к излучению абсолютно черного тела уже при толщине слоя

$$S = \frac{4,6}{A_\lambda},$$

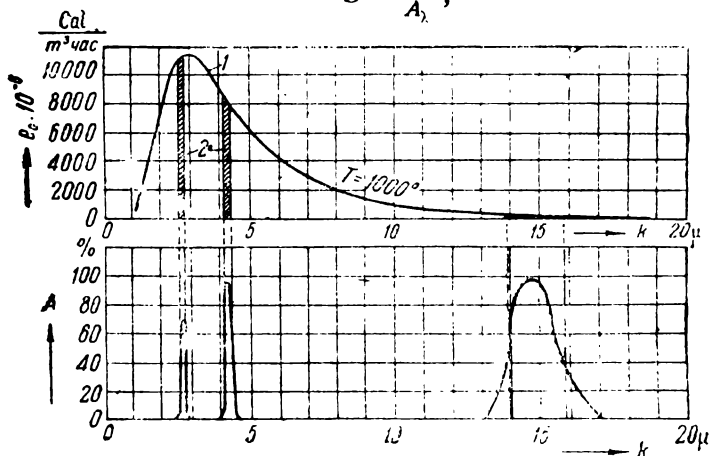


Рис. 70. Излучение газов

где  $A_\lambda$  — коэффициент поглощения лучей с длиной волны  $\lambda$  данной средой. Для смеси газов следует пользоваться формулой:

$$A = 1 - e^{-A_\lambda p S},$$

где:  $A$  — поглощательная способность смеси газов,  
 $p$  — парциальное давление данного газа в смеси.

Количество излучаемой энергии, а также и поглощательная способность газов  $A$  могут быть подсчитаны для разных температур и процентного содержания различных газов в смеси.

На основе расчетов строятся графики (рис. 71 и 72), облегчающие пользование этими данными.

Например, теплота, излучаемая с 1 м<sup>2</sup> поверхности дымовых газов фаянсового горна, содержащих 5% водяных паров и 10% углекислоты, при толщине слоя 0,2 м и температуре 1100° С, определяется следующим образом.

По графику для углекислого газа (см. рис. 71), при  $S_p = 0,2 \cdot 0,1 = 0,02$ , получим  $\varphi = 6,4\%$ . По графику для пара (см. рис. 72), при  $S_p = 0,2 \cdot 0,05 = 0,01$ , получим  $\varphi = 3\%$ . Итого  $\varphi_s = 9,4\%$ .

Количество тепла  $E_s$ , излучаемое топочными газами, будет равно, следовательно:  $E_s = \varphi_s E = 0,094 E$ , где  $E$  — тепло, излучаемое абсо-

лютно черным телом и определяемое из формулы  $E = C \left(\frac{T}{100}\right)^4$ , в которой  $C = 4,93$ , а  $T$  — абсолютная температура, равная  $1100 + 273 = 1373^\circ \text{C}$ .

Таким образом,  $E_s = 0,094 \cdot 4,93 \cdot \left(\frac{1373^4}{100^4}\right) = 16\,500 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час}$ .

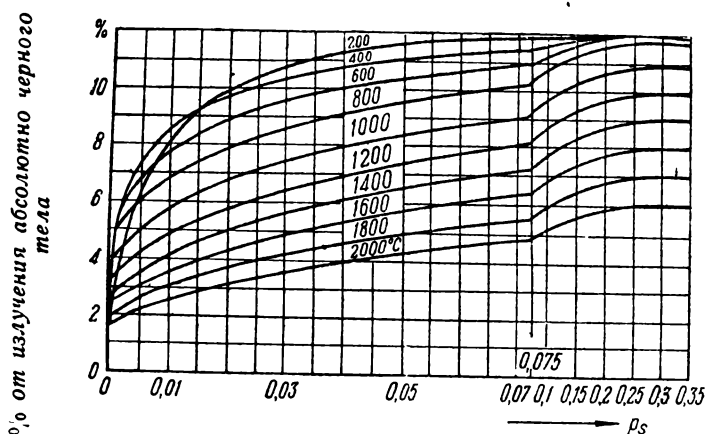


Рис. 71. Излучательная способность углекислоты при слоях разной толщины (в м)

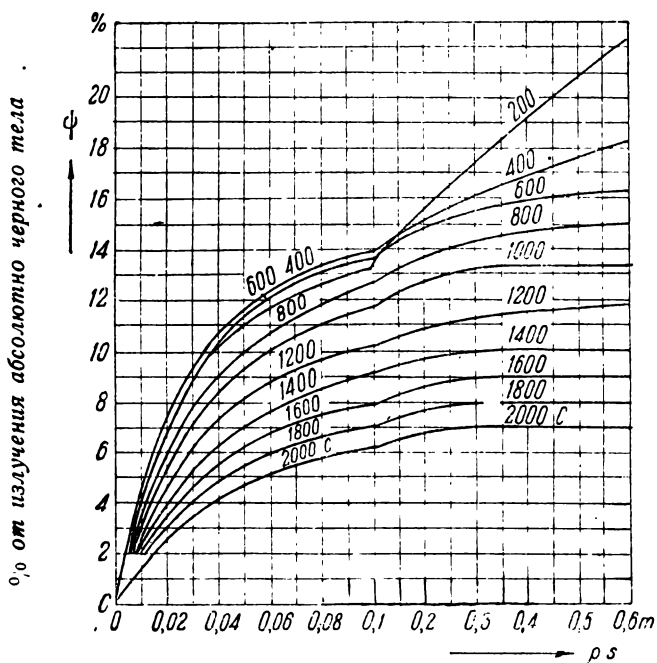


Рис. 72. Излучательная способность водяного пара при слоях различной толщины (в м)

В процессах обжига и охлаждения при высоких температурах передача тепла лучеиспусканием от нагретых поверхностей к более холодным имеет существенное практическое значение. Здесь происхо-

дит явление взаимного излучения поверхностей двух обращенных друг к другу тел.

Путем ряда математических выкладок, приводимых в специальных трудах и результирующих количество взаимно излучаемого и взаимно поглощаемого тепла, получается следующее выражение для количества тепла  $Q$ , переданного от более нагретой поверхности к менее нагретой:

$$Q = \frac{T_1^4 - T_2^4}{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma}} \cdot F \cdot Z \text{ кал.},$$

где:

$T_1$  и  $T_2$  — абсолютные температуры поверхностей,  
 $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma$  — коэффициенты излучения первого, второго и абсолютно черного тела,

$F$  — площадь излучения в  $m^2$ ,

$Z$  — время, в течение которого происходит излучение в час.

Ввиду большой разницы в значениях  $T^4$  и коэффициентов излучения, это выражение приводят к виду:

$$Q = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \cdot F \cdot Z \text{ кал.},$$

где  $C = \sigma \cdot 10^8$ .

Множитель  $\frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}}$  всегда

меньше каждого из коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$ .

Для малых произвольно расположенных и не соприкасающихся друг с другом поверхностей двух тел с разной температурой коэффициент излучения, по Нуссельту:

$$C = \frac{C_1 + C_2}{C_0}.$$

Для тела, находящегося внутри другого тела, когда одно из них целиком охвачено другим, передача тепла лучеиспусканием выражается следующей формулой:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F \cdot Z \text{ кал.}$$

Последний случай является типичным при обжиге тонкой керамики в капсулах, когда передача тепла от раскаленного капсуля, охватывающего со всех сторон изделие, происходит, преимущественно, за счет лучеиспускания.

## 2. Теплопроводность

Передача тепла благодаря теплопроводности тел проще поддается теоретическим расчетам, чем передача лучеиспусканием и кон-

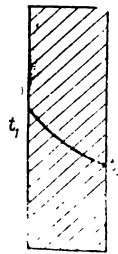


Рис. 73. Изменение температуры внутри тела при разных температурах ограничивающих поверхностей

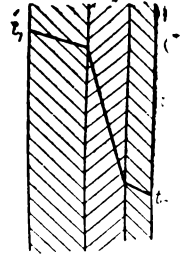


Рис. 74. Изменение температуры в многослойной стенке из материалов разной теплопроводности

векцией. Уравнение теплопроводности Фурье для плоской стены имеет в упрощенном виде следующее выражение:

$$Q = F_{\lambda} \frac{\tau_1 - \tau_2}{\delta} \text{ кал/час,}$$

где:

$Q$  — количество теплоты, передаваемое в час в больших калориях,

$F$  — поверхность одной стороны стены в  $m^2$ ,

$\lambda$  — удельная теплопроводность или коэффициент теплопроводности в  $\text{кал/м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$ , выражающий количество тепла, передаваемое в 1 час через стену площадью в  $1 m^2$  и толщиной в 1 м, при разности температур  $\tau_1 - \tau_2 = 1^\circ\text{C}$ ,

$\delta$  — толщина стены в м,

$\tau_1, \tau_2$  — температуры поверхностей стены с одной и с другой стороны.

Множитель  $\frac{\tau_1 - \tau_2}{\delta}$  называется температурным градиентом.

Для изогнутых стен с небольшим радиусом кривизны условия теплопроводности изменяются и передача тепла рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{2,73\lambda (\tau_{в} - \tau_{н})}{\lg \frac{d_{н}}{d_{в}}} \text{ кал/м} \cdot \text{час,}$$

где:

$Q$  — количество тепла, проходящее за 1 час через стенки трубы на 1 м ее длины,

$\tau_{в}$  — температура внутренней стороны трубы,

$\tau_{н}$  — " " наружной " "

$d_{н}$  — диаметр наружной поверхности трубы,

$d_{в}$  — " " внутренней " "

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности в  $\text{кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  для различных веществ имеет различные значения. В таблице 44 приводятся значения  $\lambda$  для встречающихся в теплотехнике материалов.

При некоторых теплотехнических расчетах приходится встречаться с понятием „теплопроводности“ тела, связывающим процесс теплопроводности с нагревом материала стены в процессе передачи тепла и выражающегося символом

$$\alpha = \frac{\lambda}{\gamma \cdot C},$$

где:

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности,

$\gamma$  — удельный вес тела,

$C$  — его удельная теплоемкость.

Как видно из таблиц 44 и 45, коэффициент теплопроводности для одних и тех же веществ, в зависимости от их температуры, имеет разные значения, определяющиеся по специальным эмпирическим формулам.

Поэтому изменение температуры внутри тела, имеющего разные температуры ограничивающих его поверхностей, графически характеризуются не прямой линией, а кривыми — выпуклыми или вогнутыми, в зависимости от того, повышается или понижается коэффициент теплопроводности с повышением температуры материала (рис. 73).

При наличии ряда плотно прилегающих поверхностей, спаянных или цементированных тем или иным веществом, по опытам Нус-

КОЭФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, УДЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ<sup>1</sup>

Материалы	Вес 1 м <sup>3</sup> в кг	Коэффициент теплопроводности		Удельная теплоемкость $\frac{C}{\text{кг}^\circ\text{C}}$ $\frac{\text{кал}}{\text{кг}^\circ\text{C}}$	Температуропроводность $\alpha = \frac{\lambda}{C\tau}$ $\frac{\text{м}^2/\text{час}}{\text{м}^2/\text{час}}$
		температура в °C	$\frac{\lambda}{\text{кал.}} \frac{\text{м}^2}{\text{час}^\circ\text{C}}$		
Асбестовая бумага . . .	980	20—100	0,13	0,195	0,0018
Войлок . . . . .	420	30	0,08	—	—
То же . . . . .	1240	15	0,22	—	—
Бетон сухой (1—2—2) .	1280	20	0,65	0,27	0,002
Гипс (строительные плиты) . . . . .	1250	0—50	0,37	0,25	0,0012
Графит, синтетически полученный . . . . .	1580	79	13,4	0,2	0,041
Дерево:					
дуб . . . . .	820	0—50	0,17—0,26	0,57	0,0004
ель . . . . .	550	30	0,12	0,65	0,00034
сосна . . . . .	550	0—25	0,13	0,65	0,00034
опилки . . . . .	200	0—30	0,05	—	—
Земля:					
мелкозернистая . . .	—	—	0,12	—	—
сухая . . . . .	—	—	0,58	—	—
Карборунд . . . . .	4000	600	3,35	0,28	0,003
Картон прессованный .	—	54	0,244	0,7	—
Кварцевый песок . . .	1370—1550	100	0,3—0,5	0,25—0,3	0,001
Кизельгуровый кирпич нормальной влажности (5,8%) . . . . .	710	0—20	0,145	0,18	0,001
Кизельгуровый кирпич порошкообразный влажный . . . . .	800	20	0,21	—	—
Кирпич строительный сухой, машинной формовки . . . . .	1672	0—40	0,45	—	—
Пемзовый кирпич из пемзы, щебня и цемента . . . . .	630	20	0,13	0,24	0,00086
Пробковые пластинки .	100—450	0	0,03—0,05	—	—
Слюда . . . . .	—	41	0,31	0,21	—
Стекланная вата . . .	186	0	0,03	0,16	0,001
Кирпич сырой (влажность 7,4%) . . . . .	1775	25	0,6	—	—
Кирпич сырой (влажность 10%) . . . . .	—	25	0,8	—	—
Кирпич сухой . . . . .	—	20	0,38	—	—
Торф . . . . .	100—500	0	0,03—0,07	—	—
Фарфор . . . . .	2300—2500	95	0,89	0,26	0,001
Цемент портландский (раствор) . . . . .	1715	89	0,29	0,27	0,0006
Полевой шпат . . . . .	2500	17—70	2,0	0,19	0,004
Уголь древесный . . .	200	0—100	0,055	0,2	0,0014
Коксовая мелочь . . .	1000	0—20	0,12	0,2	0,0006
Текстильные отбросы (концы, угар) . . . . .	100	50	0,0480	0,4	0,0006

<sup>1</sup> Заимствовано из книги: Тен-Бош. Теплопередача. Русский перевод В. А. Поликовского, под редакцией проф. Л. С. Лейбензона. Нефтеиздат, М.-Л., 1930.  
Для огнеупорных материалов см. табл. 45.

КОЭФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ<sup>1</sup>

Материал	Температура в °С							Химический состав					Пористость в %
	200	400	600	800	1000	1200	1400	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	ZrO <sub>2</sub>	
	в кал/м <sup>2</sup> ·час·°С							—	—	—	—	—	
Шамотный припас . . . . .	0,24	0,30	0,35	0,37	0,39	0,41	0,42	53,1	43,8	2,5	0,5	—	18,4
"                  "	0,24	0,27	0,30	0,32	0,34	0,36	0,37	54,2	38,8	2,7	1,1	—	26,7
Каолиновый . . . . .	0,34	0,38	0,41	0,43	0,45	0,47	0,48	42,0	45,9	1,5	—	—	23,2
"                  "	0,47	0,52	0,56	0,60	0,64	0,67	0,70	—	—	—	—	—	10,8
Динасовый . . . . .	0,28	0,35	0,40	0,44	0,48	0,52	0,54	97,0	не определялись			30,4	
Хромистый . . . . .	0,34	0,37	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	—	—	—	—	—	—
Магнезитовый припас . . . . .	1,37	1,25	1,03	0,95	0,90	0,87	0,85	—	—	—	—	—	—
Шпинелевый припас . . . . .	0,36	0,40	0,42	0,45	0,47	0,49	0,51	не определ.	61	не определ.	26	—	36,3
Плавленый глинозем . . . . .	0,62	0,74	0,82	0,89	0,95	1,01	1,05	—	—	—	—	—	—
Циркон . . . . .	0,35	0,39	0,42	0,44	0,41	0,98	0,49	27,3	7,8	1,6	—	50,4	29,5
Карборунд . . . . .	—	—	4,40	3,80	3,30	2,90	2,60	—	—	—	—	—	—

сельта, не замечается температурного скачка при разных теплопроводностях смежных тел.

Коэффициент теплопроводности стенки, состоящей из ряда слоев разных материалов, в этом случае определяется по формуле:

$$\lambda_m = \frac{\Delta}{\sum \frac{\delta}{\lambda}}$$

где:

$\lambda_m$  — коэффициент теплопроводности сложной стенки,

$\Delta$  — ее полная толщина,

$\lambda$  — коэффициенты теплопроводности отдельных слоев разных материалов,

$\delta$  — их толщина.

Картина распределения температур в стенке из материалов разной теплопроводности схематически показана на рис. 74. В практических условиях она гораздо сложнее, так как, обычно, в производстве не обеспечивается плотное прилегание отдельных слоев друг к другу, и они разделяются тонкими воздушными прослойками, дающими иное распределение температур в стенке. Кроме того, изменение коэффициентов теплопроводности под влиянием нагрева отдельных участков стены до разной температуры изменяет также характер полученной кривой температур.

Вопрос о теплопроводности различных перегородок, разграничивающих две среды с разной температурой, в технике почти не имеет самостоятельного значения. Он увязывается, обычно, с довольно сложными явлениями взаимной передачи тепла между поверхностями стен и жидкими или газообразными телами.

<sup>1</sup> По результатам работы F. Norton, Journ. Amer. Cer. Soc., Jan., 1930.

### 3. Теплопередача конвекцией

Конвекция заключается в более или менее регулярной смене частиц газа или жидкости у поверхности тела по мере отдачи этими частицами тепла, или, наоборот, по мере восприятия ими тепла от охлаждаемого тела.

В технике часто применяется принудительное движение жидкостей и газов, когда движение обусловлено работой специальных побудителей: насосов, вентиляторов, мешалок и пр.

В процессе конвекции играет особую роль так называемый пограничный слой жидкости или газа, прилегающий непосредственно к поверхности твердого тела.

Толщина этого слоя, а также и его температура в части, прилегающей к нормально циркулирующей жидкости или газу, резко меняются в зависимости от свойств нагреваемой или охлаждаемой поверхности, вязкости и других свойств жидкостей и газов, а также от скорости их движения и характера его (слоистое или вихревое движение).

По исследованиям Шака и Руммеля, скорость жидкостей или газов не оказывает заметного влияния на теплопередачу конвекцией при слоистом их движении. Повидимому, в этом случае передача тепла конвекцией определяется и лимитируется малой теплопроводностью пограничного слоя:

$$Q = \lambda \cdot F \cdot z \frac{(t_1 - t_2)}{\Delta} \text{ кал.},$$

где  $\frac{t_1 - t_2}{\Delta}$  — температурный градиент пограничного слоя.

По мере перехода слоистого движения в вихревое, роль скорости газов возрастает в весьма высокой степени.

Этот переход обуславливается техническими причинами (шероховатая омываемая поверхность и т. п.) и повышением скорости до величины, превосходящей критическую и обеспечивающей вихревое движение.

Взаимная передача тепла между поверхностью твердого тела и жидкой или газовой средой определяется формулой:

$$Q = \pm \alpha \cdot F \cdot z (t - \tau),$$

где:

$Q$  — количество тепла в *кал.*, передаваемого или отнимаемого от поверхности стенки (знаки  $+$  и  $-$ ), в зависимости от температур стенки и среды,

$t$  — температура жидкости или газа в  $^{\circ}\text{C}$ ,

$\tau$  — " " поверхности стенки в  $^{\circ}\text{C}$ ,

$F$  — поверхность стенки в  $\text{м}^2$ ,

$\alpha$  — коэффициент передачи тепла („теплоперехода“), т. е. количество тепла в *кал.*, передаваемое 1  $\text{м}^2$  поверхности в час при разнице в  $1^{\circ}\text{C}$ .

Установление наиболее точного коэффициента передачи тепла  $\alpha$ , соответствующего данным условиям конвекции, является довольно трудной задачей.

Юргес (Jürges) на основании опытов передачи тепла от нагреваемых пластин с разным характером поверхности к горизонтальному

## КОЭФИЦИЕНТЫ ТЕПЛО

W м/сек	$\beta_0 = 3,71 W^{0,786} \times d^{-0,16}$ для						
	1,00	0,80	0,60	0,40	0,30	0,20	0,15
0,2	1,05	1,09	1,14	1,21	1,27	1,35	1,41
0,3	1,44	1,49	1,56	1,66	1,75	1,86	1,94
0,4	1,81	1,87	1,96	2,09	2,19	2,34	2,43
0,5	2,15	2,23	2,34	2,49	2,61	2,78	2,90
0,6	2,51	2,60	2,72	2,90	3,04	3,25	3,39
0,7	2,80	2,91	3,04	3,24	3,40	3,63	3,78
0,8	3,11	3,23	3,38	3,60	3,77	4,03	4,19
0,9	3,42	3,54	3,70	3,95	4,13	4,42	4,60
1,0	3,71	3,85	4,72	4,29	4,49	4,81	5,00
1,2	4,28	4,44	4,65	4,96	5,18	5,55	5,77
1,4	4,83	5,01	5,24	5,59	5,86	6,25	6,51
1,6	5,37	5,57	5,82	6,20	6,51	6,96	7,23
1,8	5,89	6,10	6,39	6,81	7,14	7,62	7,83
2,0	6,40	6,63	6,94	7,40	7,75	8,28	8,62
2,2	6,89	7,14	7,48	7,97	8,35	8,92	9,30
2,4	7,38	7,66	8,01	8,53	8,95	9,56	9,95
2,6	7,86	8,15	8,53	9,09	9,52	10,20	10,60
2,8	8,33	8,64	9,75	9,63	10,10	10,80	11,20
3,0	8,80	9,12	9,55	10,2	10,70	11,40	11,80
3,5	9,93	10,3	10,8	11,5	12,0	12,8	13,4
4,0	11,00	11,4	11,9	12,7	13,4	14,3	14,9
4,5	12,10	12,5	13,1	14,0	14,7	15,7	16,3
5,0	13,10	13,6	14,2	15,2	15,9	17,0	17,7
5,5	14,20	14,7	15,3	16,4	17,2	18,3	19,1
6,0	15,20	15,7	16,4	17,5	18,4	19,6	20,4
7,0	17,1	17,7	19,6	19,8	20,7	22,2	23,1
8,0	19,0	19,7	20,6	22,0	23,0	24,6	25,6
9,0	20,9	21,7	22,7	24,1	25,3	27,0	28,1
10,0	22,7	23,5	24,6	26,2	27,5	29,3	30,6
Температурный фактор							
t	100	200	300	400	500	600	700
$\rho$	1,048	1,095	1,141	1,187	1,232	1,277	1,321
Фактор							
L	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0
$\varphi$	0,918	0,923	0,928	0,935	0,943	0,953	0,965



## ПЕРЕДАЧИ В ТРУБАХ

диаметров $d$ в метрах						
0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04
1,51	1,54	1,57	1,60	1,64	1,69	1,75
2,08	2,12	2,16	2,20	2,26	2,33	2,41
2,61	2,65	2,70	2,76	2,83	2,91	3,02
3,17	3,16	3,22	3,29	3,37	3,47	3,60
3,62	3,68	3,76	3,84	3,93	4,05	4,20
4,75	4,12	4,20	4,29	4,40	4,52	4,70
4,79	4,57	4,66	4,76	4,88	5,02	5,21
4,93	5,02	5,12	5,22	5,35	5,52	5,71
5,36	4,45	5,56	5,68	5,82	5,99	6,21
6,18	6,29	6,42	6,56	6,72	6,92	7,17
6,98	7,10	7,24	7,40	7,58	7,80	8,09
7,76	7,89	8,05	8,22	8,41	8,67	8,99
8,51	8,65	8,82	9,01	9,24	9,51	9,87
9,24	9,40	9,58	9,78	10,00	10,30	10,70
9,95	10,1	10,3	10,5	10,8	11,1	11,6
10,70	10,9	11,1	11,3	11,6	11,9	12,4
11,30	11,6	11,8	12,0	12,3	12,7	13,2
12,00	12,2	12,5	12,7	13,0	13,5	14,0
12,70	12,9	13,2	13,5	13,8	14,2	14,7
14,3	14,6	14,9	15,2	15,5	16,0	16,7
15,9	16,2	16,5	16,9	17,3	17,8	18,4
17,5	17,8	18,1	18,5	18,9	19,5	20,2
19,0	19,3	19,7	20,1	20,6	21,2	22,0
20,5	20,8	21,2	21,7	22,2	22,9	23,7
21,9	22,3	22,7	23,2	23,8	24,5	25,4
24,7	25,1	25,6	26,2	26,8	27,6	28,7
27,5	27,9	28,4	29,0	29,8	30,7	31,8
30,1	30,7	31,3	31,9	32,7	33,7	35,0
32,7	33,5	34,0	34,7	35,5	36,6	38,0
$\rho = 1 + 0,00048 t - 0,00000003 t^2$						
800 1,365	900 1,408	1000 1,450	1200 1,533	1400 1,613	1600 1,691	1800 1,767
$\varphi = L^{-0,054}$						
1,5 0,978	1,0 1,000	0,9 1,005	0,8 1,011	0,7 1,018	0,6 1,025	0,5 1,035

потоку воздуха дает следующую зависимость коэффициента  $\alpha$  от скорости воздуха  $W$ :

	$W \leq 5$ м/сек.	$W > 5$ м/сек.
Полированная поверхность . . . . .	$\alpha = 4,8 + 3,4 W$	$\alpha = 6,12 \cdot W^{0,78}$
Прокатанная поверхность . . . . .	$\alpha = 5,0 + 3,4 W$	$\alpha = 6,14 \cdot W^{0,78}$
Шероховатая поверхность . . . . .	$\alpha = 5,3 + 3,6 W$	$\alpha = 6,47 \cdot W^{0,78}$

Для расчетов нагревания воздуха в трубах в разных случаях заводской практики можно пользоваться формулами и таблицей инж. Германсена.<sup>1</sup> Основная формула для определения среднего коэффициента теплопередачи конвекцией в трубах следующая:

$$\beta = \beta_0 + \rho + \varphi,$$

где:

$\beta_0$  — коэффициент теплопередачи при 0° С,

$$\beta_0 = 3,71 W^{0,786} d^{-0,16} (W — скорость в м/сек, d — диаметр в м);$$

$\rho$  — температурный фактор:  $\rho = 1 + 0,00048 t - 0,00000003 t^2$ ;

$\varphi$  — фактор длины трубы;  $\varphi = L^{-0,054}$  ( $L$  — длина трубы в м).

В таблице 46 приведены коэффициенты ( $\beta_0$ ,  $\rho$ ,  $\varphi$ ) теплопередачи в трубах при высоких температурах газов (рекуператоры, печные каналы).

При трубах некруглого сечения в формулу

$$\beta = 3,71 W_0^{0,786} d^{-0,16}$$

вводится вместо  $d$  значение  $d_0$  для эквивалентной трубы:

$$d = \frac{4F}{\delta},$$

где:  $F$  — площадь сечения канала в м<sup>2</sup>,

$\delta$  — часть периметра в м, по которой происходит теплообмен.

Помимо применения в расчетах теплового порядка для керамического производства общеизвестных формул, некоторые расчеты до сих пор базируются на приближенных эмпирических данных, не проверенных в условиях точного эксперимента и дающих, в связи с этим, крайне пестрые конечные результаты. Совершенно очевидна необходимость исследовательской работы для установления достаточно точных коэффициентов теплопередачи в специфических условиях работы теплоустановок керамических заводов.

## II. Теплообмен в сушилках и печах

### 1. Условия теплообмена в керамических печах и сушилках

Основной задачей газообмена в печах и сушильных камерах является методический нагрев или охлаждение керамических изде-

<sup>1</sup> А. Германсен. Industrial furnace technique. Английский перевод. 1929.

лий, при одновременном воздействии газовой среды на ход технологических процессов — удаление выделяющейся влаги, окисление или восстановление отдельных составных элементов, заключающихся в керамическом черепке, и пр. Эта роль газовой среды в тепловой обработке керамических изделий и материалов и предъявляемые к ней разнообразные требования и обуславливают сложность процессов теплопередачи и управления работой теплоносителей в печах и сушилках.

Нагрев изделий (например кирпича) в сушилках зависит не только от температуры воздуха или дымовых газов, скорости их циркуляции, характера и формы поверхности изделий, но и от скорости испарения влаги, которая (скорость), в свою очередь, связана, в известной мере, с подачей влаги из внутренних слоев материала. Способы размещения высушиваемых изделий (штабелевка) на стеллажах, вагонетках или конвейерных полках влияют на скорость и направление паровоздушных потоков у поверхности высушиваемых изделий, что определяет коэффициент передачи тепла конвекцией.

Поэтому определение значений коэффициента  $\alpha$  для высушиваемого изделия и паровоздушной смеси при переменной их влажности и больших скоростях, принятых в современных сушилках, является весьма важной задачей. Кроме того, для использования результатов опытных исследований в производственных условиях требуется глубокое изучение аэродинамики газообмена для разных типов сушилок, изделий и способов их штабелевки в рабочей камере.

Особо стоит вопрос о сушке изделий тонкой керамики (например фарфора и фаянса) в гипсовых формах, являющихся промежуточным телом между некоторыми поверхностями изделия и теплоносителем и, одновременно, активным влагопоглощающим элементом. В определенный интервал времени (рабочий цикл) форма, с почти уже высохшим изделием или освобожденная от него, под воздействием горячего воздуха хорошо просушивается и вследствие этого непосредственно после формовки особенно интенсивно отбирает влагу от последующего изделия до тех пор, пока поры формы не напитаются влагой.

Таким образом, гипсовая форма вносит весьма существенный корректив в режим сушки, в основном характеризуемый температурой, влажностью и скоростью циркулирующей паровоздушной смеси. Изделие вместе с формой, в которую оно заключено, представляет весьма сложную систему, находящуюся под влиянием ряда факторов, резко меняющихся в процессе сушки. При заформовке изделие имеет максимальную влажность, а форма — наименьшую; изделие весьма плотно прилегает к форме, что обеспечивает хорошую передачу влаги из массы заформованного изделия через поры гипсовой формы к ее поверхности.

В этот период есть все данные для интенсивной сушки слоев массы, прилегающих к гипсовой форме. Скорость сушки зависит от интенсивности съема влаги с омываемой воздухом стороны формы и от суммарного показателя теплопередачи (трансфузии) всей системы изделие-форма. По мере удаления влаги и усадки массы, между изделием и формой образуется щель, заполненная паровоздушной прослойкой; эта прослойка малоподвижных газов создает дополнительное сопротивление на пути влаго- и теплопередачи. В этом втором периоде сушки роль гипсовой формы сводится, главным образом, к предохранению недостаточно прочного изделия от деформации. В то же время форма задерживает просушку прилегающей к ней стороны изделия. Поверхность же изделия, доступная непосредствен-

ному омыванию воздухом, в течение всего цикла находится в условиях нормального режима сушки.

В силу указанных условий, задача теоретического расчета теплопередачи при сушке изделий в гипсовых формах является весьма сложной и требует большой предварительной исследовательской работы непосредственно на изделиях массового производства. При сушке крупных изделий, например шамотных брусев и „фасона“, требующих особых предосторожностей для получения равномерной усадки по всем сечениям изделия и в связи с этим равномерного прогрева изделия в начальный период сушки, — учет теплопроводности и температуропроводности высушиваемого материала имеет большое значение для установления правильного режима.

В процессах обжига и охлаждения передача тепла от печных газов к изделиям и от последних к воздуху происходит по разным схемам, обусловленным особенностями производства и конструкцией печей.

Наиболее простой является схема, по которой нагревание изделий производится непосредственно топочными газами, а охлаждение их — потоком воздуха, т. е. схема, применяемая в печах для обжига грубой керамики.

Работа пламени в печах периодического действия протекает в иных условиях, чем в непрерывнодействующих, например, туннельных печах. В непрерывнодействующих печах пламенный поток имеет постоянную или маломеняющуюся мощность и температуру по отдельным зонам, и его работа обусловлена регулярной сменой обжигаемого материала, взаимодействующего с отдельными частями газового потока.

Устойчивые условия работы пламени в отдельных зонах позволяют установить в них определенную интенсивность передачи тепла и регулировать мощность теплового потока для обеспечения заданного режима обжига. Расчеты теплопередачи осложняются изменением коэффициента теплопроводности с возрастанием температуры изделий и сложностью определения температуры пламени и его теплопроводности в разных местах факела; последнее объясняется недостаточной еще изученностью процесса догорания топочных газов в каналах насадки, а также перемешивающего и каталитического влияния последней. Переменный состав топочных газов, вследствие догорания их на значительном протяжении (как правило, широко практикующегося в керамических печах), и, наряду с этим, часто встречающееся разбавление печных газов подсосами воздуха, дают значительное колебание теплопроводности пламени, что имеет в обжиге керамических изделий большое значение при высоких температурах обжига и большой роли теплопередачи лучеиспусканием в процессе выравнивания температуры в разных частях печей.

В печах периодического действия кроме вышперечисленных факторов необходимо при анализе работы пламени учитывать влияние переменного топочного режима, дающее большие (а иногда и резкие) колебания состава топочных газов, а также влияние стен и сводов, в начале отдающих тепло в камеру, а в дальнейшем забирающих много тепла на нагрев кладки.

Тепло, аккумулированное кладкой стен и сводов, в наибольшей степени влияет на процесс охлаждения печных камер, работающих с кратковременным циклом (обжиг фаянса, фарфора), где излучение стен и сводов, меняющееся в зависимости от расписания работы печи, не поддается точному учету.

При обжиге фарфора, фаянса и других видов тонкой керамики помещаемых в камеру или на вагонетки в капсулах, исключается возможность непосредственного омывания изделий топочными газами и теплопередача осуществляется по схеме, приведенной на рис. 75. Топочные газы омывают капсулы и отдают им путем конвекции и лучеиспускания часть своего тепла. Теплота, благодаря теплопроводности, передается через стенки капсулы к внутренней их поверхности, откуда с помощью конвекции передается внутрикапсульной среде. Конвекция возникает естественным путем, вследствие разности температур стенки и газов, и усиливается прососами топочных газов между небольшими щелями капсулей.

Благодаря конвекционным потокам и лучеиспусканию от нагретых стенок капсулы нагреваются обжигаемые изделия.

Стенки капсулы создают значительное сопротивление тепловому потоку и потому всегда наблюдается отставание нагрева изделий от температуры капсулей и в еще большей степени от температуры

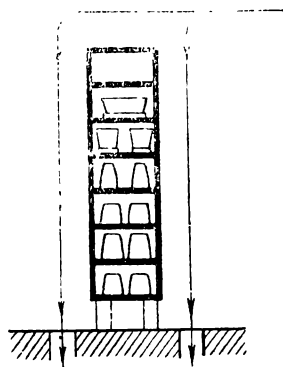


Рис. 75. Схема обжига фарфора в капсулах

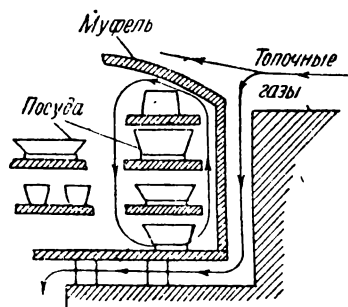


Рис. 76. Схема теплообмена в муфельной печи

газовой среды. Это отставание особенно заметно в начальный период обжига, когда капсулы имеют низкую температуру, и лишь по мере возрастания последней, когда усиливается теплопередача излучением, температура изделий (при небольшой их массе) выравнивается с температурой капсулей. Передача тепла излучением растет пропорционально разности четвертых степеней температур ( $T_1^4 - T_2^4$ ), тогда как коэффициент передачи тепла естественной конвекцией  $\alpha$  возрастает пропорционально  $\sqrt[4]{t_1 - t_2}$ . Отсюда становится очевидной преобладающая роль излучения в нагреве изделий внутри капсулы и сложность расчета теплопередачи для системы: *циркулирующие топочные газы — капсуль — газы со слабой конвекцией — изделие*.

Аналогичная схема процесса теплопередачи, но с обратными знаками, получается и при охлаждении изделий, обжигаемых в капсулах. Разница лишь в том, что при расчетах отпадает фактор переменной теплопроводности газов, так как в этом случае циркулирует чистый воздух.

Для обжига в муфельных печах изделия загружаются внутрь муфеля на плитки, по нижеописанной схеме (рис. 76). Топочные газы омывают стенки муфеля и отдают им часть тепла, которое, благодаря теплопроводности материала стенки, передается к внутренней поверх-

ности муфеля и дальше за счет циркуляции внутримуфельных газов и лучеиспускания нагреваемым изделиям. Однако, здесь приходится считаться со значительно ухудшенными (по сравнению с капсульным обжигом открытым пламенем) условиями теплопередачи, так как, в виду крупных размеров муфеля, соответственно увеличивается толщина его стен и расположенные изделия выходят из сферы непосредственного воздействия лучистой теплоты и муфельных стен.

Вследствие замедленной теплопередачи муфельный обжиг требует больше времени и тепла, является весьма невыгодным и применяется поэтому лишь в случае специальных производственных условий.

В печах, обогреваемых электрическим током, передача тепла имеет некоторые общие черты с обжигом в муфелях. Источником тепла в таких печах являются нагревательные элементы, имеющие пластинчатую форму и расположенные у стен и свода печной камеры или обжигательной зоны туннеля.

Тепло нагревательных элементов передается путем естественной конвекции воздуха и лучеиспускания непосредственно изделиям, размещенным на плитках.

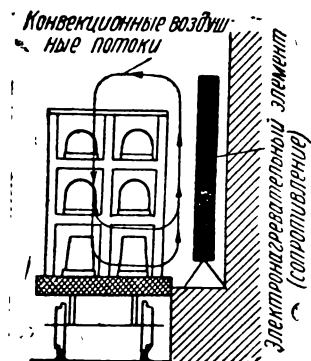


Рис. 77. Схема теплообмена в электрической туннельной печи

От схем муфельного обжига эта схема отличается устранением одного звена в цепи теплопередачи, а именно — передачи тепла от топочных газов муфельной стенке (рис. 77).

Если учесть довольно длинный путь превращений других видов энергии в электрическую и транспорт последней к электрическим печам, то эту схему нагрева, в общем, нужно считать наиболее сложной.

Изучение условий теплопередачи дает пути для разрешения вопросов обжига в отношении быстроты и равномерности нагрева изделий в разных местах печной камеры при заданных условиях движения пламени и его температуре.

## 2. Скорость сушки и обжига

Продолжительностью сушки и обжига определяется производительность сушилок и печей и стоимость этих процессов, а также и ряд качественных факторов, влияющих на себестоимость готовой продукции. На основе практических данных и опытных исследований, можно установить минимум времени, необходимый для нормального проведения процесса сушки или обжига данного изделия. В производственных условиях этот нижний предел продолжительности процесса существенно корректируется в сторону увеличения, ввиду невозможности осуществления в производственных печах режима обжига, протекающего единообразно (вполне синхронно) для всех загруженных изделий, вследствие неравномерного их нагрева в разных участках камеры.

Поэтому для заводских установок продолжительность процессов теплообработки устанавливается так, чтобы гарантировать доброкачественный выход изделий и в тех частях рабочей камеры, в которых имеют место наиболее неблагоприятные отступления от устано-

вленной кривой обжига. В современных теплоустановках вполне возможны устройства, обеспечивающие форсированную сушку и обжиг, и в этом отношении скорость указанных процессов ограничивается требованиями технологического порядка и неодинаковым протеканием процесса в различных сечениях камеры.

Исключение составляет обжиг до высокой температуры порядка 1400—1500°С на топливе, не обеспечивающем необходимого высокого пирометрического эффекта горения. В этом случае обжиг затягивается сверх установленного регламента по причине малой разницы температур пламени и обжигаемой продукции. Степень неравномерности сушки и обжига усиливается по мере увеличения объема рабочей камеры и уплотнения ее загрузки выше известного норматива. Это происходит вследствие ухудшения циркуляции горячих газов. Увеличение кубатуры камер и вагонеток, а также более плотная их загрузка изделиями дают рост производительности установок. Но вместе с тем, вследствие увеличения степени неравномерности нагрева затягивается процесс, что неизбежно дает противоположный эффект — снижение производительности. Очевидно, что для каждого вида изделий и каждого типа теплоустановок между крайними пределами кубатуры камер или вагонеток, плотности их загрузки и продолжительности теплообработки можно найти оптимальное их соотношение, дающее минимальную себестоимость продукции.

Увеличение производительности установок является непосредственным результатом уменьшения неравномерности температурного поля. На разрешение этой проблемы и направлено сейчас внимание конструкторов и работников по эксплуатации печей и сушилок.

### 3. Природа пламени и распределение газов в печной камере

Для уяснения процессов, протекающих в керамических печах, необходимо предварительно остановиться на основных положениях, характеризующих свойства пламени и на законах движения газов применительно к условиям керамических производств. Физическая и химическая природа пламени и вопросы статики и динамики газов подробно освещены в специальной литературе.

При сжигании всех видов технического топлива получается пламя, состоящее из потока раскаленных светящихся газов. Свечение пламени в производственных установках обусловлено наличием в этом потоке твердых раскаленных частиц углерода, а также летучей золы и пр.

Газы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{CO}$  светятся, если происходит горение в сжатом кислороде (до 20 ат, по Франкланду). Окончание процесса горения характеризуется отсутствием догорающих частиц углерода и уменьшением свечения продуктов горения, — факел пламени обрывается. Величина и форма пламени определяются мощностью газового потока, скоростью горения (следовательно, и догорания светящихся частиц углерода) и внешними условиями, направляющими процесс горения в ту или иную сторону. Длина факела пламени определяется соотношением скорости движения топочных газов и скорости их горения. При заданной скорости газового потока и замедлении реакции горения длина пламени соответственно увеличивается и наоборот.

Скорость горения топочных газов зависит от их состава, температуры и интенсивности смешения их с воздухом. Кроме того, скорость реакции горения определяется избытком воздуха или газа. Сопоставление данных Ле-Шателье о скоростях горения водорода

и метана при разных избыточных количествах воздуха характеризует влияние этого фактора на скорость горения топочных газов.

*Горение водорода*

Содержание в горючей смеси водорода в объемных единицах на 100 объемных единиц воздуха . . . . .	10	20	30	40	50	60	70
Скорость горения смеси в м/сек .	0,60	1,95	3,30	4,85	3,45	2,30	1,10

*Горение метана*

Содержание в горючей смеси метана в объемных единицах на 100 объемных единиц воздуха . . . . .	6	8	10	12	14	16
Скорость горения смеси в м/сек . . . . .	0,03	0,23	0,42	0,61	0,36	0,10

Максимальные скорости горения отдельных газов резко отличаются друг от друга и для каждого газа эти максимальные скорости получаются лишь в случае, если газ смешивается с таким количеством воздуха, которое близко к теоретически необходимому для полного горения.

Реакции горения проходят быстрее при высоких температурах. По Хелье (Helier), за три минуты при разных температурах в соединении вошли следующие количества смеси водорода и кислорода:

При температуре (в °С) . .	180	200	240	330	430	620	825	845
Количество смеси, вступившей в соединение (в %) . .	0,04	0,12	1,3	9,8	39,8	84,5	96,1	взрыв

Следовательно, устойчивое горение газов, входящих в воздушную смесь, возможно лишь при температурах выше 850°С и при повышении температуры проходит с возрастающими скоростями. Однако, для газов, дающих продукты горения, распадающиеся при высоких температурах, предел дальнейшему ускорению реакции горения ставит прогрессирующий распад продуктов горения.

Реакция  $\text{CO}_2 = \text{CO} + \frac{\text{O}_2}{2}$  идет с увеличением объема. Поэтому увеличение давления, по закону Ле-Шателье, должно задерживать процесс диссоциации.

Процесс диссоциации в пределах температур керамических печей не может иметь большого количественного значения. Проф. В. Е. Грум-Гржимайло, считая, что при температурах мартеновских печей потеря тепла за счет диссоциации составляет около 3—4%, придает большое значение фактору диссоциации при высоких температурах горения газа в горячем воздухе, когда явление диссоциации снижает первоначальную температуру горения, причем сгорание продукта диссоциации СО происходит уже после снижения темпера-



туры пламени, вследствие чего процесс горения замедляется. Состав топочных газов и потребный избыток воздуха для керамических и других печей обусловлены видом топлива и требованиями экономного его использования (большой избыток или недостаток воздуха приводит к увеличению потерь). Поэтому указанные факторы являются для каждой установки более или менее стабилизированными и не могут быть произвольно изменяемы для регулирования скорости горения топочных газов и выравнивания температуры в печной камере.

Разбавление воздуха, подаваемого для горения, инертными газами, например топочными, и обогащение его кислородом являются довольно сложными процессами, не получившими еще широкого применения. Гораздо большие возможности для ускорения и замедления процесса горения и смещения его фокуса (зоны наивысших температур) в нужном направлении достигаются регулированием температуры воздуха, подаваемого в печь, и степени его смешения с распыленным топливом (газ, распыленное твердое и жидкое топливо).

Изменение температуры нагрева воздуха и места его подачи к факелу пламени может весьма разнообразно отражаться на скорости горения и температуре пламени в разных участках факела и имеет поэтому весьма крупное значение в деле регулирования работы пламени в печной камере, не говоря уже о большом экономическом эффекте, который достигается повышением температуры горения. Поэтому во всех современных тепловых установках, по возможности, предусматриваются устройства для всемерного использования подогретого воздуха и наиболее гибкого регулирования подачи его в топку.

В зависимости от технологических заданий, выполняемых тепловыми установками, возникают разные требования к работе пламени в печи. Температура газов в печах колеблется в пределах 500—1700°С и выше при наличии разных требований к равномерности нагрева в отдельных участках рабочей камеры. Керамические печи должны давать равномерный подъем температуры по заданной кривой во всех сечениях камеры и во всех стадиях теплообработки, начиная от температуры в 100°С и кончая температурой порядка 1000—1500°С. Это требование в крупных производственных печах, в силу возникающих трудностей, выполняется со значительными отклонениями, поэтому с технологической стороны конструкции печей и расцениваются в зависимости от выполнения указанных требований.

С другой стороны, в ряде печей (хотя бы в шахтных для обжига кварца) желательно иметь сосредоточенный нагрев и, следовательно, максимальную концентрацию горения в небольшой части печного пространства с последующим, по возможности, быстрым падением температуры пламени и охватываемой им продукции.

Имеется ряд других печей для разнообразных промышленных целей, в которых к работе пламени предъявляются требования, промежуточные между двумя приведенными выше, также довольно точно регламентированные для получения наилучшего выхода продукции при минимальных затратах топлива.

Многообразные и сложные задачи управления пламенем в промышленных печах нуждаются в каждом случае в тщательном анализе условий горения с учетом установленных опытными исследованиями и практикой закономерностей и правил эксплуатации. Процесс горения возможен только при непосредственном контакте частицы горючего с частицей кислорода и потому естественно, что первым

условием интенсивного горения является обеспечение участия в процессе в данный отрезок времени наибольшего числа частиц горючего и кислорода. Поскольку использование заранее приготовленных смесей горючего с воздухом практически не имеет распространения (из-за опасности взрыва) и смешение производится непосредственно перед началом горения, то упомянутое условие для интенсивного горения осуществляется в топочных камерах и горелках. Разница температур и удельных весов газов обуславливает тенденцию к расслоению потока и медленному горению. Сжигаемое топливо дает, в соответствии с его теплотворной способностью, определенное количество калорий тепла. Затягивание процесса горения на большом участке пути, проходимом горящими газами, приводит к увеличению теплоотдачи омываемым поверхностям (топки, печной насадки) и, следовательно, к уменьшению количества тепла, идущего на нагрев самих продуктов горения и снижению температуры последних (температура пламени).

При высоких скоростях получается интенсивное перемешивание газов в результате образования вихрей. Вихревые кольца образуются

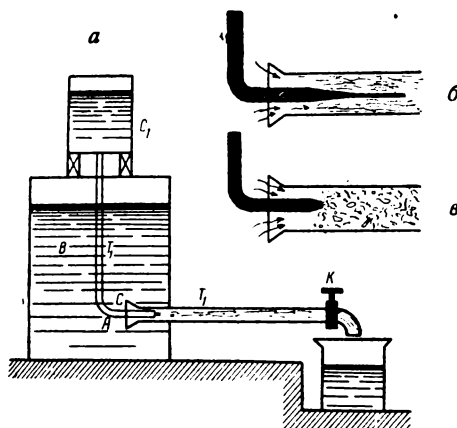


Рис. 78. Опыт Рейнольдса

вследствие механического увлечения более холодных струй воздуха в пограничную наружную часть струи топочных газов под влиянием разрежения, получающегося в месте соприкосновения потока большой скорости с неподвижной или медленно текущей средой. Чем выше скорость струи, тем больше вихревых колец, тем лучше перемешиваются газы и более высока скорость горения. Вихревые кольца способствуют устойчивости горения. При скоростях, превышающих, так называемую „критическую скорость“, движение всей струи переходит в вихревое (турбулентное), обусловленное явлениями гидродинамического порядка.

Существует два типа движения жидкостей и газов по трубам.

Когда жидкость или газ течет параллельными струйками, то такое движение называется струйным или слоистым (ламинарным); когда же движение сопровождается непрерывным перемешиванием, то оно называется вихреобразным или турбулентным движением. Различие между ламинарным и турбулентным движением жидкости и газов было опытным путем доказано английским физиком Рейнольдсом.

Для проведения опыта берется наполненный водой стеклянный сосуд (рис. 78а) с выводной трубой  $T_1$ , закрываемой краном  $K$ . Над сосудом  $B$  устанавливается второй сосуд  $C_1$  с тонкой трубкой, выходящей в трубу  $T_1$  и закрываемой краном  $K$ . Верхний сосуд наполняется краской. Открыванием крана регулируется скорость движения воды в трубе. Характер движения контролируется с помощью краски, подаваемой в трубу. При малых скоростях устанавливается слоистое движение воды, и краска вытекает ровной струей, не перемешиваясь с водой (см. рис. 78б). При увеличении скорости движения воды достигается так называемая „критическая скорость“, при которой струйное (слоистое, ламинарное) движение нарушается и переходит в вихреобразное, что приводит к перемешиванию струи

краски с водой и окрашиванию последней (см. рис. 78*в*). Путем определения расхода воды по сечению трубы подсчитывается величина критической скорости, при которой движение исследуемой жидкости переходит из струйного в вихревое. Уменьшая скорость, можно вихревое движение перевести обратно в струйное при скорости меньшей, чем это было установлено для перехода в вихревое движение. Таким образом, для этих переходов имеются две критические скорости — верхняя и нижняя:

$$W_{1кр} \text{ и } W_{2кр}, \text{ где } W_{1кр} > W_{2кр}.$$

У стен трубы при турбулентном движении остается слой, сохраняющий ламинарное (струйное) движение; ближе к центру скорость увеличивается за пределы критической скорости; на границе крайнего слоя, имеющего ламинарное движение, и главной струи, имеющей вихревое движение, жидкости или газы перемещаются с критическими скоростями. Значения критических скоростей для разных жидкостей и газов зависят от постоянного множителя — числа Рейнольдса  $Re$  и кинематической их вязкости  $\nu$ , в свою очередь являющейся функцией абсолютной вязкости (или коэффициента внутреннего трения  $\eta$  и плотности жидкости (или газа)  $\gamma$ :

$$\nu = \frac{\eta g}{\gamma},$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести, равное  $9,81 \text{ м/сек}^2$ .

Общими выражениями для критических скоростей будут следующие:

$$W_{кр}^1 = \frac{Re'd}{\gamma \cdot \nu} \text{ и } W_{кр}^2 = \frac{Re''d}{\gamma \cdot \nu},$$

где:

$W_{кр}^1$  — критическая скорость перехода струйного движения газа (жидкости) в вихревое (турбулентное),

$W_{кр}^2$  — критическая скорость перехода вихревого движения в струйное (ламинарное),

$Re'$  и  $Re''$  — верхнее и нижнее значение числа Рейнольдса,

$\nu$  — кинематическая вязкость жидкости (или газа), определяемая физическими свойствами данного состояния (температуры, давления и т. д.),

$d$  — диаметр трубы (или гидравлический радиус сечения)  $= \frac{F}{\pi}$ ,

где  $F$  — площадь, а  $\pi$  — периметр сечения).

Общее выражение для числа Рейнольдса —  $Re$  — вытекает из формулы:

$$Re = \frac{Wd}{\nu}.$$

Для круглых труб нижнее значение величины  $Re$ , приблизительно, равно 2000.

Коэффициент внутреннего трения  $\eta$  для идеальных газов не зависит от давления  $p$ . Однако, для действительных газов  $\eta$  меняется при значительных колебаниях давления (порядка нескольких атмосфер). В условиях эксплуатации сушилок и печей не приходится встречаться с такими значительными колебаниями давлений и потому влиянием этого фактора на изменение вязкости газов можно игнорировать без существенной погрешности.

Изменение коэффициента  $\eta$  в зависимости от температуры выражается формулой Сузерленда (Sutherland):

$$\eta = \eta_0 \frac{1 + \frac{c}{273}}{1 + \frac{c}{T} \sqrt{\frac{273}{T}}}$$

Для вычисления вязкости по этой формуле в таблице 47 приводятся значения констант  $\eta_0$  и  $c$  для разных газов и ( $c$  с грубым приближением) для типичных их смесей.<sup>1</sup>

Таблица 47

КОНСТАНТЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФИЦИЕНТОВ ВЯЗКОСТИ ГАЗА (по формуле Сузерленда) ДЛЯ ТЕМПЕРАТУР В ПРЕДЕЛАХ 180—1200 °С

Газы	$c$	$\eta \frac{\text{кг/см}}{\text{м}^2}$
Воздух . . . . .	114	$168 \cdot 10^{-8}$
Кислород . . . . .	128	$180 \cdot 10^{-8}$
Азот . . . . .	110	$160 \cdot 10^{-8}$
Водород . . . . .	74	$83 \cdot 10^{-8}$
Водяной пар . . . . .	673	$87 \cdot 10^{-8}$
Углекислота . . . . .	260	$137 \cdot 10^{-8}$
Окись углерода . . . . .	100	$160 \cdot 10^{-8}$
Генераторный газ . . . . .	150	$148 \cdot 10^{-8}$
Продукты горения . . . . .	173	$151 \cdot 10^{-8}$

Подача горючих газов и воздуха в горелках со скоростями, которые превышают критическую скорость  $W_1$  (определяемую путем вычислений или специальных опытов), обеспечивает идеальное смешение газов, большую скорость горения и высокую температуру пламени на коротком расстоянии от горелок. При струйном (ламинарном) давлении газов их смешение обусловлено образованием вихрей „технического“ порядка на границе струй, вследствие разных скоростей и направлений отдельных струй (сужения и расширения каналов).

Влияние скоростей движения топочных газов на их смешение и температуру пламени в наибольшей степени сказывается при узких вылетах в печную камеру, загруженную сплошь до топочных вылетов недостаточно огнеупорным материалом, например капсулами с фарфоровой или иной посудой. Высокие скорости, весьма интенсивное смешение и высокие температуры топочных газов приводят к местным пережогам и деформации капсул. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете топочных вылетов и проектировании подвода встречного воздуха, если он используется для горения. Дальнейшая работа пламени протекает уже в печной камере, загруженной обжигаемыми изделиями или сырыми материалами.

#### 4. Движение и работа горячих газов в печной камере

Работа печных газов в период обжига керамической продукции, а также и воздушных потоков в процессе охлаждения загруженной

<sup>1</sup> Заимствовано из книги Тен-Бош — „Теплопередача“ и др. источников.

в камеры и вагонетки продукции определяется рядом факторов: общим теплосодержанием потока печных газов, его теплопроводностью и другими показателями теплопередачи к нагреваемым поверхностям, различной интенсивностью теплопередачи в самой нагреваемой системе (например, передача тепла к монолитному шамотному брусу, или к капсулю, загруженному изделиями), скоростью движения газов, температурными перепадами (градиентами) между пламенем и печной загрузкой в разных участках камеры и другими обстоятельствами. Для выяснения процессов, протекающих при обжиге и охлаждении керамической продукции, необходимо всестороннее изучение как работы активного теплоносителя (печных газов и охлаждающего воздуха), так и роли пассивного участника теплообмена (печной загрузки), определяющего, в известной мере, направление, скорости печных газов и другие условия теплопередачи.

Равномерный нагрев керамической продукции, имеющей, по преимуществу, весьма низкую теплопроводность, является весьма сложной задачей, для успешного решения которой необходимо наибольшее приближение к выполнению двух следующих условий:

1) получение потока пламени с наименьшим падением температуры за весь период его взаимодействия с отдельными участками печной загрузки при достаточной интенсивности теплоотдачи, обеспечивающей равномерный подъем температуры всей загрузки по заданной оптимальной кривой обжига;

2) распределение пламенного потока внутри загрузки, обеспечивающее равномерный газо- и теплообмен по всей массе обжигаемой продукции.

Испытанным способом для частичного выполнения первого условия является затягивание реакции горения, по возможности, на весь период пребывания газа в печной камере. В идеальном случае на каждом небольшом участке работы пламени в реакцию горения должно вступать такое количество горючих газов, которое полностью компенсирует теплоотдачу газового потока на этом участке теплообработки. Однако, затягивание горения уменьшает температуру пламени и потому при высокой конечной температуре нагрева обжигаемых изделий для получения необходимого перепада температур между печными газами и загрузкой камеры необходимо вести процесс горения с расходом воздуха, близким к теоретическому, пользоваться сухим топливом, а также умело использовать, при наличии возможностей, горячий воздух. Неправильное использование горячего воздуха может привести в некоторых случаях к чрезвычайному ускорению горения и концентрации высоких температур в топочных устройствах и у вылетов в печную камеру, что влечет за собой преждевременное разрушение топок, местные пережоги продукции у топочных вылетов и неравномерный обжиг остальной загрузки камеры.

Поэтому для догорания желательной доли газов в самом загрузочном пространстве камеры пользуются подачей через загрузку вторичного горячего воздуха, причем горение в топках ведется со значительным химическим недожогом (с недостатком воздуха). Регулируя подачу первичного и вторичного воздуха и их температуру, можно обеспечить равномерный обогрев изделий на значительном участке пути, проходимого печными газами. Эти условия легко создаются в зоне высоких температур некоторых туннельных печей, по конструкции допускающих такое регулирование подачи вторичного и первичного воздуха.

Для выполнения второго условия — равномерного распределения печных газов среди нагреваемых изделий — необходимо правильное конструктивное разрешение вопроса циркуляции газов при постройке самой печи. В такой же мере необходимо и нормальное заполнение камеры или вагонеток в процессе эксплуатации, с соблюдением размеров и расположения промежутков, требуемых для движения пламени.

Вопросы загрузки камеры или вагонетки имеют громадное значение при проектировании печей. От решения этих вопросов зависит установление продолжительности и степени равномерности обжига и охлаждения; поэтому проектирование печей без параллельного проектирования загрузки камер или вагонеток (для туннельных печей) недопустимо, а неправильная эксплуатация печей без создания необходимых условий для нормальной циркуляции газов — весьма убыточное дело.

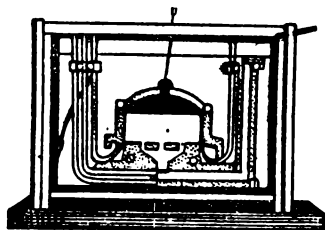


Рис. 79. Модель печи с прямым пламенем

В. Е. Грум-Гржимайло на моделях керамической кирпичеобжигательной печной камеры. На рис. 79 показано лишь частичное заполнение печной камеры легкой жидкостью (в опыте — заполнение керосином при погружении модели в водный аквариум), когда она подается в камеру и удаляется из нее восходящими потоками. Только частичное заполнение газами печной камеры, или, во всяком случае, неравномерное омывание капсул печными газами, часто имеет место в керамических печах, например в фарфоровых горнах с восходящим движением пламени. На рис. 80 показано полное и неизбежное заполнение печной камеры легкой жидкостью при нисходящем движении уходящих из нее потоков. Такое заполнение печной камеры горячими газами получается во всех керамических печах, работающих с нисходящим направлением движения печных газов, удаляемых через подовые отверстия.

Вторым выводом гидравлической теории движения газов является характеристика их распределения в серии каналов, открывающихся в газораспределительную и газосборную камеры при нагреве насадки горячими стынущими газами или ее охлаждении холодными нагревающимися газами. Загрузка печных камер и вагонеток туннелей почти всегда имеет вертикальные каналы — газоходы той или иной формы, открытые в верхнее подсводное пространство и в нижнюю газосборную камеру, образуемую сводом пода или специальными подставками, на которых устанавливаются обжигаемые изделия.

Рассмотрим движения восходящего и нисходящего потоков печных газов, проходящих через каналы, оставленные между обогреваемыми капсулами, в горнах с прямым и обратным пламенем.

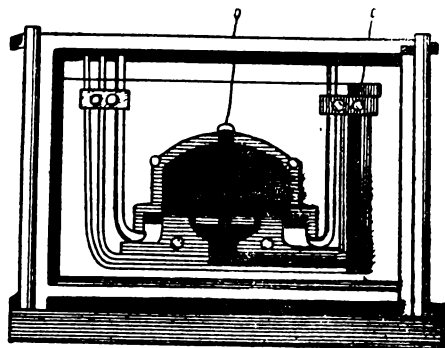


Рис. 80. Модель печи с обратным пламенем

В горнах с восходящим пламенем (рис. 81) поток топочных газов, выходя из радиального подподового канала, распределяется на несколько меньших восходящих потоков  $q^1$ ,  $q^2$ ,  $q^3$ , направляющихся в каналы, расположенные между столбами капсулей. Печные газы равной температуры, попадая в каналы, отдают тепло, в зависимости от их сечения и скоростей отдельных потоков, неравномерно, и температуры газов в каналах получаются разные.

Предположим, что температура одной из ветвей газового потока  $q^1$ , вследствие более узкого сечения канала и снижения скорости газов, станет ниже, чем в потоке  $q^2$ ; тогда удельный вес газов потока  $q^1$  делается больше, чем в потоке  $q^2$ , и потому в потоке  $q^1$  гидростатический напор делается ниже и скорости еще более снизятся, чем в смежном потоке  $q^2$ . Таким образом, обмен газов в более широком канале  $q^2$  будет все время возрастать за счет более узких каналов,

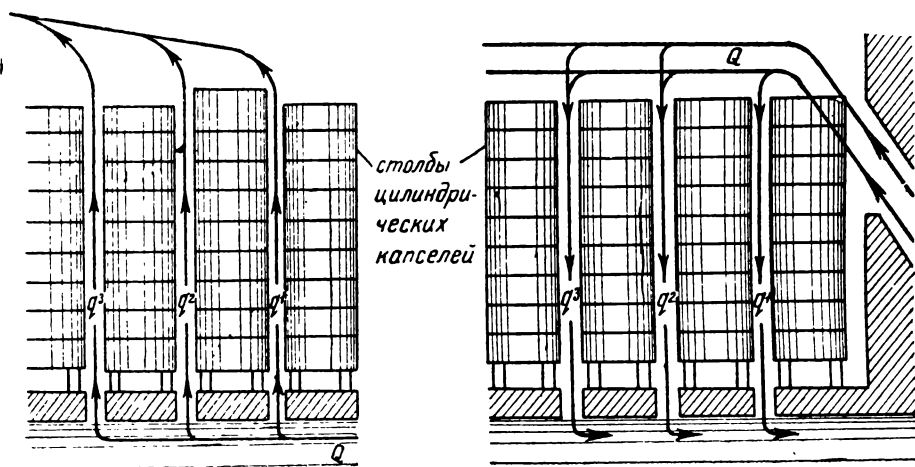


Рис. 81. Распределение горячих газов между капсулями при восходящем и нисходящем пламени

а в канале  $q^1$  ослабевать, что приведет к соответствующей разнице температур смежных капсулей. Таким образом, в самом принципе нагрева восходящими потоками горячих газов заложены тенденции неравномерного нагрева обжигаемых изделий. Совершенно обратные результаты получаются при нагреве изделий нисходящими потоками печных газов в печах с так называемым обратным пламенем, например в керамических печах, в которых отработанные газы отводятся через подовые отверстия (см. рис. 81).

При разветвлении потока печных газов на нисходящие ветви  $q^1$ ,  $q^2$ ,  $q^3$  в случае замедления теплообмена в первом канале получится большее остывание потока и соответствующее увеличение удельного веса газов по сравнению со смежными потоками  $q^2$ ,  $q^3$ .

Более тяжелые газы потока  $q^1$  будут опускаться с большей скоростью, чем более легкие газы смежных потоков, и, таким образом, усилятся нагревание изделий, ограничивающих поток  $q^1$ , и установится температура, равная температуре смежных газовых потоков. Наоборот, для потока более горячего, т. е. проходящего в более нагретой части загрузки камеры, вследствие более низкого удельного веса газов

получается снижение скорости их движения и, следовательно, постепенное отставание подъема температуры оmyваемых газами капсулей. Работа нисходящих газовых потоков в процессе обжига дает возможность обеспечить равномерный нагрев садки под влиянием возрастания и уменьшения гидростатического напора в отдельных каналах в зависимости от колебания температуры ограничивающих каналы поверхностей.

---



## ГЛАВА ПЯТАЯ

### ПЕЧИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

#### I. О классификации тепловых установок

В керамической промышленности применяются теплоустановки разных типов. Часто на старых заводах можно встретить, наряду с наиболее современными установками, печи и сушилки весьма устарелой конструкции. За последние 20 лет номенклатура теплового оборудования разрослась и потому дать сжатую и в то же время исчерпывающую классификацию этого оборудования, с учетом всех отличий, не представляется возможным.

Самый выбор основного признака классификации еще не вполне определен. Наряду с подразделением печей и сушилок на группы, различающиеся характеристикой теплового процесса, часто можно встретить классификацию по роду обжигаемой продукции (например, фарфоровые и фаянсовые горны), по способу транспортирования изделий в сушилке (конвейерные, стеллажные, карусельные и др.), по методу обогрева (паровые, воздушные) и по другим признакам.

Конструкция и показатели работы печей и сушилок в наибольшей мере определяются рабочим циклом установки и основной схемой движения продукции и циркуляции рабочих агентов — топочных газов, паровоздушной смеси и др. Остальные отличительные признаки целесообразно использовать при классификации лишь в той мере, в какой они влияют на основной процесс и являются в отдельных случаях неотъемлемым спутником последнего, например, применение полочного конвейера в сушилках для посуды, определяющее, в известной мере, схему циркуляции воздуха и режим сушки изделий.

Исходя из указанных соображений, попытаемся наметить основные вехи для подразделения тепловых установок керамических заводов на основные группы и типы.

Все тепловые установки по технологическому признаку могут быть отнесены к печному или сушильному хозяйству.

Большая разница температур сушки и обжига исключает возможность создания каких-либо промежуточных групп, хотя в эксплуатации печные и сушильные установки бывают столь тесно связаны, что работа сушилки зависит от работы печей, а в печах, как правило, в той или иной мере заканчивается процесс сушки.

По ходу технологического процесса, в первую очередь производится сушка, и потому сушилки, казалось бы, необходимо рассмотреть в первую очередь. Однако, на керамических заводах сушилки обогреваются частично или полностью за счет тепловых отходов печного хозяйства. Количество горячего воздуха, подаваемого из печей в сушилки, определяет как структуру вспомогательного парового хозяйства, так и конструкцию сушил. Сушильное хозяйство, обычно, проектируется в тесной увязке с печами — ведущим звеном в оборудовании предприятий.

Поэтому описание теплоустановок целесообразнее начать с печей, являющихся основными потребителями топлива и одновременно поставщиками тепла для сушилки и обогрева цеховых помещений.

Типы сушилок, их конструктивные особенности и работа описаны в главах одиннадцатой и двенадцатой.

Печи для обжига керамических изделий по их производственному циклу подразделяются на две основные группы: 1) печи периодического действия и 2) печи непрерывнодействующие.

Цикл работы периодических печей состоит из:

- 1) загрузки камеры изделиями;
- 2) обжига (нагревание);
- 3) охлаждения и
- 4) разгрузки.

Тепловое состояние печной атмосферы и работа самой печи меняется в продолжение указанного цикла работы по заданному графику. С каждым новым циклом работы условия обжига повторяются в той же последовательности, если по характеру продукции или топлива не изменялся график обжига.

Периодические печи требуют неослабного наблюдения за регулировкой топок и шиберов для получения необходимого повышения или понижения температуры и необходимой газовой среды.

Печи непрерывного действия имеют в разных частях (зонах) более или менее постоянную температуру и газовую среду; нагрев или охлаждение изделий происходит путем их постепенного перемещения из одной зоны в другую.

Регулировка работы туннельных печей состоит в поддержании заданной для отдельных зон температуры и газовой среды и регулярном перемещении продукции через отдельные зоны.

Существует третий, промежуточный, тип печей — кольцевые и многокамерные (последние часто называются газокамерными).

Каждая камера таких печей (или участок кольцевого канала) работает по циклу периодической печи, т. е. проходит стадии: загрузки, обжига (нагревания), охлаждения и выгрузки. Все же печь, как единая система, обладает некоторыми признаками непрерывнодействующих печей, так как имеет непрерывную загрузку, разгрузку, обжиг и охлаждение очередных камер.

Печи периодического действия подразделяются на однокамерные и двух- и трехкамерные (блокированные). В последних 2-я и 3-я камеры обогреваются отходящими газами 1-й камеры.

Если требуется обжигать изделия при разной температуре, то во 2-ю и 3-ю камеры загружают изделия, обжигаемые при низких температурах, за счет отходящих газов 1-й камеры.

Примером таких печей являются двух- и трехэтажные печи для обжига фарфора, майолики и капселей.

Для получения во 2-й и 3-й блокированных камерах температуры, одинаковой с температурой 1-й камеры, в них устраивают

дополнительные топки, включаемые, обычно, после окончания обжига в 1-й камере, или топочные газы из топок 1-й камеры направляются во 2-ю и 3-ю камеры.

По направлению газового потока в печной камере различаются печи с боковым пламенем (например, Гофманская печь, Кассельская печь), с прямым пламенем, с обращенным пламенем, а также печи с комбинированным направлением пламени, в котором имеются восходящие, боковые и нисходящие потоки.

Иногда встречается характеристика печей по устройству топок и применяемому топливу, что вносит путаницу в классификацию печей. Вид топлива и связанные с этим конструктивные особенности топочных устройств должны быть обусловлены соображениями техно-экономического порядка, из коих основным является качество получаемой из обжига продукции. Работа же самой печи по рабочему циклу, схеме газового потока и основным показателям остается, при использовании различных видов топлива и конструкций топок, прежней; поэтому эти признаки не являются характерными и приемлемыми для классификации печных установок.

Простейшими печами для обжига керамических изделий являются напольные печи с боковым движением топочных газов, возникшие в глубокой древности из первобытного костра, закрытого с боков и сверху (для устранения потерь тепла при обжиге простейших лепных глиняных изделий).

Дальнейшим усовершенствованием напольных печей является Кассельская печь, обладающая установившимися пропорциями камеры и боковой решеткой для более равномерного распределения печных газов по сечению камеры.

Печи с горизонтальным направлением газов, дающие недожог нижних рядов продукции, постепенно выходят из употребления. Значительное применение и теперь еще имеют более совершенные однокамерные печи с восходящим пламенем, в которых при весьма изощренном ведении обжига можно получить однородную, удовлетворительную по качеству, продукцию.

## **II. Прямоугольные и круглые печи с восходящим пламенем**

В печах с горизонтальным направлением пламени и односторонним размещением топок обжигаемые изделия нагреваются неравномерно. Наибольшее отставание в подъеме температуры наблюдается у пода в углах камеры, удаленных от топочных вылетов, в связи с чем нельзя строить печи этого типа с большими камерами. В круглых и прямоугольных печах с топками, равномерно размещенными по периферии печной камеры, даже при значительном ее объеме, можно получить более равномерный обжиг изделий. Естественно, что этот тип печей имеет широкое распространение в разных отраслях керамической промышленности.

В печах с прямым пламенем топочные газы подаются в печную камеру снизу через специальные подовые каналы или непосредственно в пролеты нижней части загрузки камеры. Отработанные дымовые газы удаляются через отверстия в своде печи в сборную камеру и оттуда — в дымовую трубу. В печах, установленных под открытым небом, дымовые газы из сводовых отверстий иногда выходят прямо в атмосферу.

Топочные газы проходят через обжигаемую загрузку камеры восходящими потоками, устремляются вверх по кратчайшим путям

и полуфабрикат нагревается в зависимости от его размещения (ставки, садки) весьма неравномерно. При загрузке камеры требуется большой навык и практическое изучение особенностей данной печи в смысле распределения в камере газовых потоков; большее или меньшее открытие подовых каналов для топочных газов может дать пестрый обжиг с наличием пережога и недожога или в некоторой степени устранить эти недочеты в зависимости от правильного учета движения газов и возникающих местных сопротивлений.

Печи с прямым пламенем дешевы в постройке и эксплуатации, вследствие простоты их конструкции и долговечности. Однако, затруднения, возникающие при обжиге таких изделий, для которых требуется равномерность температуры в камере, вынуждают постепенно переходить на более совершенные печи с обратным пламенем. В настоящее время печи с прямым пламенем сохранились только в производствах, не предъявляющих строгих требований к обжигу или не имеющих достаточных средств для перехода на более совершенное оборудование (на небольших кустарных предприятиях грубой керамики). Некоторые печи с прямым пламенем переводятся с обжига тонкой керамики (фарфора, фаянса) на обжиг кварца, шамотной глины и т. п. материалов.

Круглый горн Кировского завода прямого пламени, применявшийся в отдаленные времена для обжига фаянса, пережил перепланировку завода, оказался вне фабричных помещений и используется для обжига кварца в нижней камере.

### III. Печи с обратным пламенем

В керамических печах с обратным пламенем топочные газы омывают загруженные в камеру изделия и, оборачиваясь вниз, проходят через подовые отверстия и каналы. Отработанные дымовые газы отбираются в боров через каналы пода, и потому камера всегда наполнена горячими газами, что обеспечивает более ровный нагрев продукции, чем в горнах с восходящим пламенем. В печных камерах, загруженных керамическими изделиями, имеются между последними вертикальные каналы, в которых, как об этом уже говорилось выше, при нисходящем движении горячих газов устанавливается автоматическое регулирование их циркуляции; это облегчает как конструктивное оформление печи, так и управление ее работой. Указанное преимущество печей с обратным пламенем послужило причиной большого их распространения. Однокамерные печи с обратным пламенем получили наиболее широкое применение в производствах грубой керамики (строительные и огнеупорные материалы) и в фаянсовом производстве.

Однокамерные печи, хотя и обеспечивают желательные условия обжига, но имеют весьма низкий тепловой коэффициент полезного действия и в последние годы почти во всех отраслях керамической промышленности вытесняются более экономичными многокамерными кольцевыми и туннельными печами. Использование однокамерных печей параллельно с более совершенными объясняется, с одной стороны, необходимостью использовать старое оборудование заводов до его полной амортизации, а с другой стороны, и некоторыми удобствами этих печей. Отдельные виды керамической продукции, например, декоративную керамику и изделия пестрого чередующегося ассортимента, значительно проще обжечь в обособленных камерах, в которых для каждой партии можно выбрать самостоятельный режим

обжига, наиболее для нее благоприятный. В то же время обжигать пеструю продукцию, требующую разных условий обжига, в туннельных или кольцевых газо-камерных печах было бы весьма затруднительно и в некоторых случаях невыгодно. Поэтому в производствах немассового порядка, требующих специального режима обжига, однокамерные печи могут еще долго применяться, и в то же время на заводах массового производства они вытесняются более эффективными установками.

Однокамерная печь с обратным пламенем является довольно гибким тепловым аппаратом и может использоваться для обжига разных видов керамики. Все же наилучшие показатели теплоиспользования, производительности и выхода продукции получаются в тех случаях, когда размеры и конструкция печи приспособлены к особенностям обжига определенного вида изделий.

Размеры камер определяются предельным для данных изделий допуском для колебания конечной температуры обжига и условиями эксплуатации (загрузки, выгрузки); чем больше, при соблюдении этих условий, получаются размеры камеры, тем выше тепловой коэффициент полезного действия.

Остальные конструктивные элементы печей определяются, в основном, видом сжигаемого топлива, температурой и темпом обжига и некоторыми другими, менее значительными, обстоятельствами. Для иллюстрации приводим описание и характеристику работы следующих однокамерных печей с обратным пламенем:

1) прямоугольные и круглые горны для обжига каменных кислотоупорных изделий и канализационных труб, работающие на угле и дровах;

2) круглые горны для утильного и политого обжига фаянсовой посуды, работающие на угле;

3) круглые горны для утильного и политого обжига санитарных изделий (полевошпатовый фаянс), работающие на дровах.

Горн № 2 Боровичского кислотоупорного завода построен в одном блоке с рядом других самостоятельных камер, имеет прямоугольную камеру и три топки, расположенные с одной стороны камеры (рис. 82).

Дымовые газы отводятся в общую трубу, что весьма затрудняет регулирование тяги во время работы нескольких горнов. Согласно испытаниям этого горна, проведенным Ленинградским теплотехническим институтом,<sup>1</sup> загрузка горна колеблется около 5 т готовой (обоженной) кислотоупорной посуды.

Характеристика обжига, проводимого в период испытания на дровах, показана на диаграммах температур, газовой среды и часового расхода топлива (рис. 83). Кривая подъема температуры обжигаемого товара показывает медленный подъем ее до 300 °С, обеспечивающий удаление остаточной гигроскопической влаги без растрескивания изделий.

Одностороннее распределение топок и затруднения в регулировке тяги дают неравномерное распределение тепла в камере (рис. 84).

Линии равных температур (изотермы) наглядно показывают, что наиболее сильное отставание нагрева загрузки (ниже 650 °С) наблюдается в мертвых углах на поду камеры у топочной ширмы и у про-

---

<sup>1</sup> В. Д. Моро и И. И. Палеев. Керамические печи, ч. I, вып. 2, Обследование печей завода „Красный керамик“, ЛОТИ, 1932.

тивоположной толкам стены. В начальный период обжига (окурка) следует ожидать еще более неравномерного распределения температур (температурного поля) по сечению камеры.

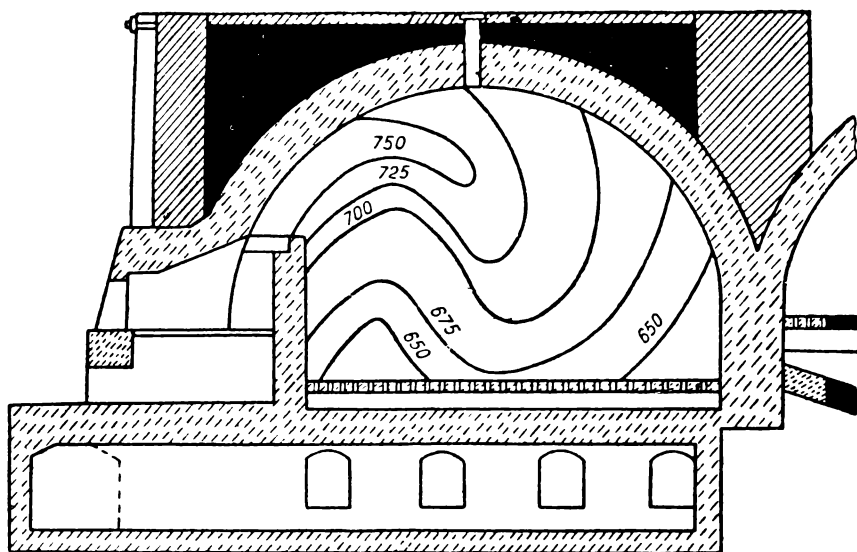


Рис. 82. Печь с обратным пламенем для обжига кислотоупорных изделий

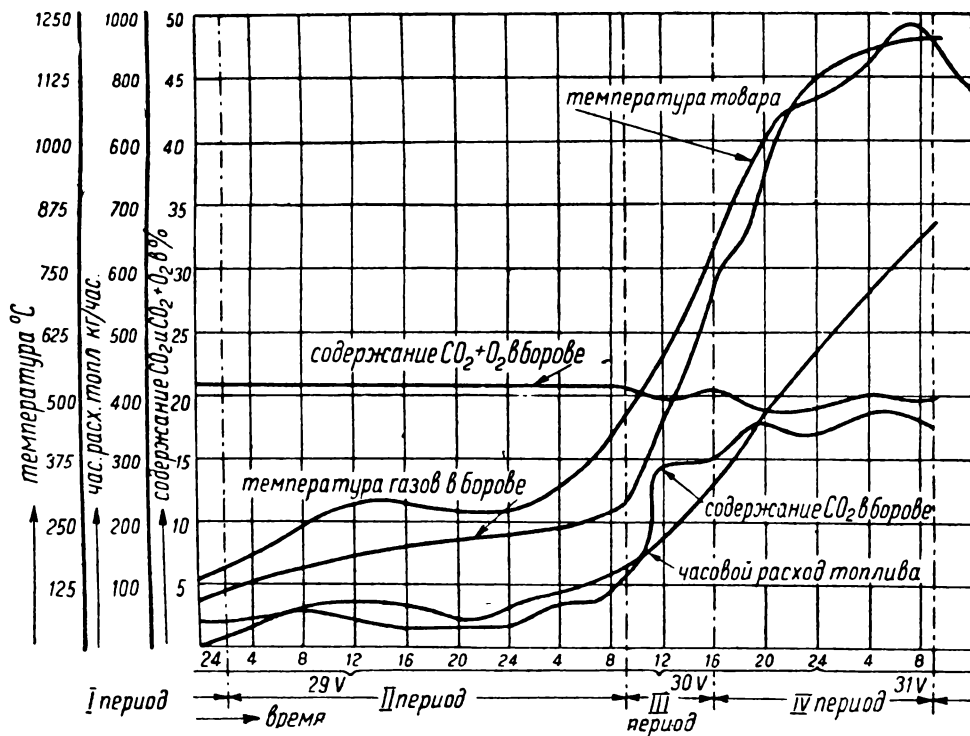


Рис. 83. Кривые температуры и газовой среды при обжиге кислотоупорных изделий в периодической печи

Некоторая задержка обжига в камерных печах этого типа является следствием неудачной их конструкции и обуславливает повышенный расход тепла, составляющий, по данным обследования,

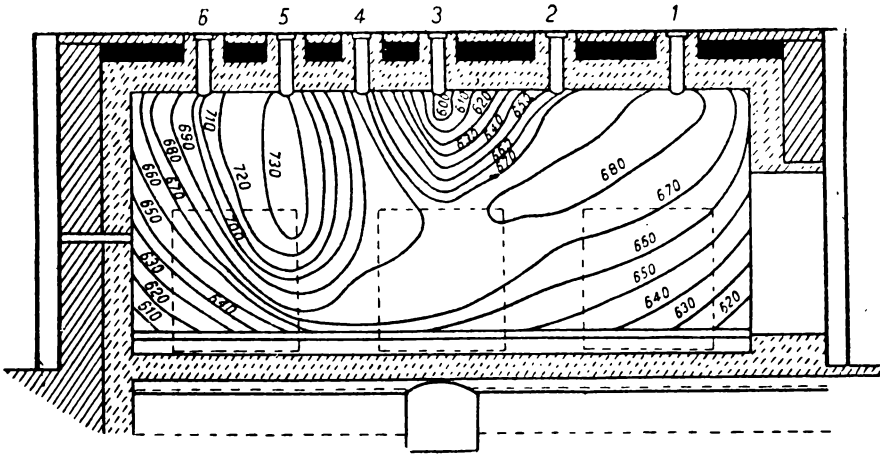


Рис. 84. Изотермы прямоугольной печной камеры с односторонним размещением топок

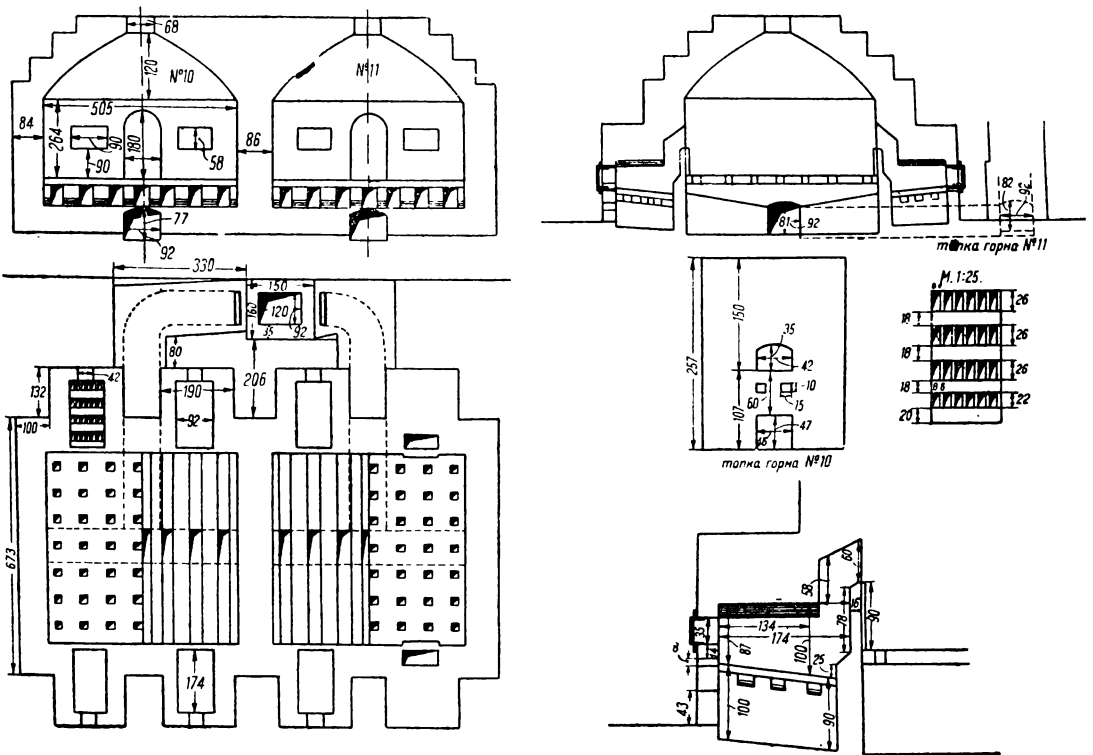


Рис. 85. Прямоугольные печи с симметричным расположением топок

около 450 000 кал на 1 м<sup>3</sup> рабочего пространства печи за все время обжига. При обжиге кислотоупорных колец наполнителей до температур 1200 °С в горне № 13, одинаковой конструкции с горном № 2,

расход тепла за обжиг на 1 м<sup>3</sup> рабочей камеры составлял в период обследования около 650 000 кал. Прямоугольные однокамерные горны с обратным пламенем, используемые на заводе „Коминтерн“ для обжига кислотоупорных колец наполнителей, отличаются от горнов описанного выше типа симметричным расположением топок у противоположных стен и удобством регулирования тяги. Горны спарены по две камеры в одном блоке (с общей дымовой трубой) и, обычно, работают поочередно, что позволяет легко регулировать тягу. Остальные конструктивные особенности горнов этого типа видны из рис. 85.

Эти горны (№ 10 и № 11) имеют объем рабочего пространства по 77 м<sup>3</sup>, аналогичную конструкцию и весьма близкие друг к другу показатели работы. Загрузка камер, в среднем, 195 кг колец наполнителей и 344 кг капсулей на 1 м<sup>3</sup> рабочего пространства. Средний расход тепла на один обжиг — 133 млн. кал.

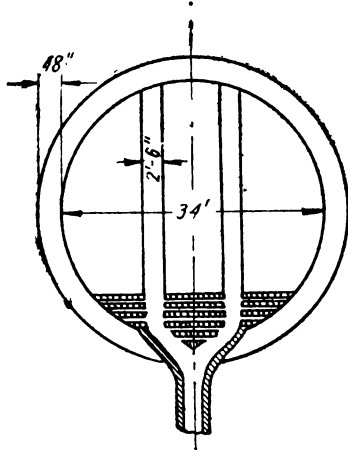
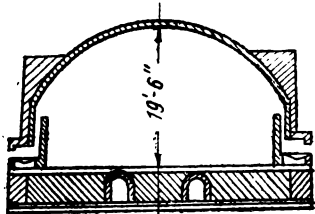
Благодаря симметричному расположению четырех топок и подбору сечений подовых каналов, через которые отводятся отработанные дымовые газы, в этих горнах можно получить достаточно равномерный нагрев обжигаемой продукции с разницей температур не выше 30—50° при обжиге до 1280 °С в течение 45 часов.

Некоторые изделия, обжигаемые без капсулей и огнеупорных поддерживающих плит (сосуды из каменных масс и т. п.), не выдерживают высокой загрузки в печной камере и потому устанавливаются в один или два ряда. В таких случаях для получения высокой производительности печей их проектируют с большой площадью и малой высотой камеры. Равномерный обогрев камер с большой площадью пода возможен лишь в круглых печах с большим числом топок, равномерно распределенных по периферии камеры.

Рис. 86. Круглый горн с обратным пламенем для обжига труб

Описание и тепловые балансы двух горнов этого типа (№ 1 и № 2) для обжига канализационных труб приведены в работе Говарда Менсур.<sup>1</sup> Горн имеет камеру диаметром в 10,3 м, высотой в 2,66 м до пят свода и около 6 м до замка свода и 10 топок с горизонтальными колосниковыми решетками (рис. 86).

Топки имеют такие размеры: длина 1,06 м, ширина 0,84 м и высота 0,76 м. Дымовые газы проходят через отверстия в поду с общей площадью в 5,85 м<sup>2</sup>, собирательные поперечные каналы, имеющие суммарное сечение 1,63 м<sup>2</sup>, и главный дымоход с площадью сечения 0,83 м<sup>2</sup>; дымовая труба имеет в высоту 21 м. Горны загружаются канализационными трубами в два яруса, нижний ряд ста-



<sup>1</sup> Howard Mansur. The heat balances of some ceramic kilns. Journ. of Amer. Cer. Soc., № 2, 1931.



вится на глиняные кольца (рули, жгуты), а трубы верхнего яруса — непосредственно на нижние с размещением в шахматном порядке.

Малые трубы вставляются в крупные в целях уплотнения загрузки, достигающей, в среднем, 62,5 т сырых и 51,7 т обожженных труб. Продолжительность обжига 67 часов. Конечная его температура 1200°C. Расход топлива (орешкового и смешанного угля) 26,6 т с калорийностью 146 000 000 кал.

Повышение температуры показано на рис. 87 для трех точек: на уровне пода 2, на уровне верхнего края заборной двери 1 и в борове 3.

В производстве фаянса для утильного и политого (глазуровочного) обжига чаще других типов периодических печей применяются однокамерные горны с обратным пламенем.

Как правило, фаянс обжигается на бисквит при температуре порядка 1200—1250°C, а политый обжиг производится в пределах температур 1100—1175°C в зависимости от принятого в производстве состава массы и глазури. Обжиг фаянса на бисквит определяет прочность готовых изделий и пористость бисквита, влияющие (прочность и пористость) на качество глазуровки изделий и посортный выход готовой продукции. При неравномерном обжиге получается фаянсовый бисквит разнообразной пористости. Изделия разной пористости при глазуровке их окунанием в глазурь нормальной консистенции покрываются неодинаковым слоем последней, в связи с чем возникает ряд дефектов, как например: „сухой край“ при тонком слое и „натечи“ и „цек“ при толстом слое глазури.

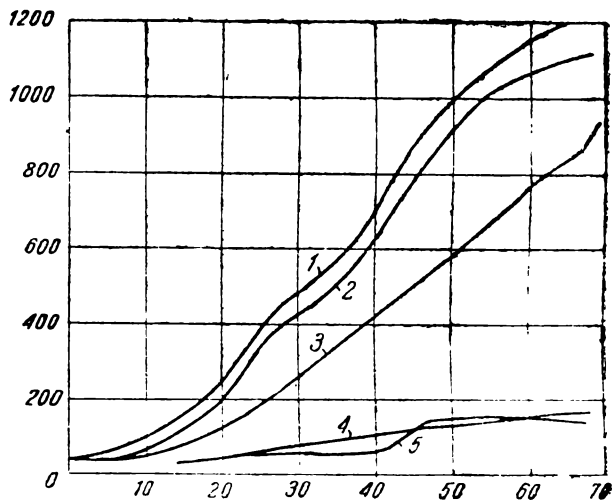


Рис. 87. Кривые температур при обжиге труб в крупном горне

Кроме того, черепок при разной пористости имеет неодинаковый коэффициент расширения при нагревании, что приводит при стабильном коэффициенте теплового расширения глазурного слоя к растрескиванию („цеку“) или „отколам“ глазури.

В политом обжиге фаянса неравномерный нагрев также приводит к ряду дефектов: недожог до заданной температуры дает неполный розлив глазури, неровный слой и недостаточный блеск; пережог приводит к впитыванию глазури в черепок, отчего получается „сухой край“ (выступающая через глазурный слой шероховатость черепка).

В связи с изложенным, фаянсовое производство предъявляет высокие требования к работе печей в части равномерности температурного поля, что весьма затрудняет возможность использования отработанных газов для обжига в двухэтажных или многокамерных печах, даже при невысоких температурах обжига легкого (известкового) фаянса. При использовании отработавших на высоком обжиге

газов для дальнейшего более легкого обжига во второй камере конечная температура и ее распределение в этой последней находятся в зависимости от работы первой камеры и потому не могут точно укладываться в предписываемый режим фаянсового обжига. По этой причине самостоятельная камера с обратным пламенем среди установок периодического действия дает наилучший качественный выход фаянса.

Бисквитный обжиг фаянса, при котором происходит удаление гидратной и остатков гигроскопической влаги и который протекает при более высокой конечной температуре, требует обжига более продолжительного, чем обжиг глазурованного фаянса. При обжиге последнего нагревается уже обожженный черепок и в задачу процесса входит лишь расплавление и равномерное распределение глазури по поверхности черепка при относительно невысоких температурах.

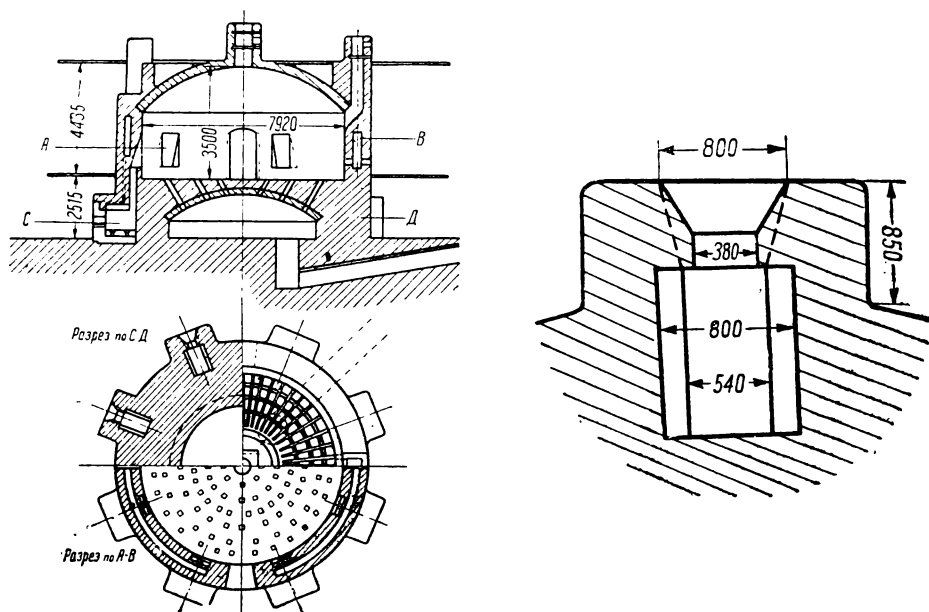


Рис. 88. Круглый горн для бисквитного обжига фаянса

Большая продолжительность бисквитного обжига фаянса и замедление в повышении температуры в конечной стадии обжига позволяют выравнивать температуру и при большой кубатуре камеры, тогда как в политом обжиге специальная затяжка последнего для выравнивания температуры в большой камере может привести к местным пережогам и некоторым дефектам продукции, например к повышенному впитыванию глазури в черепок. Поэтому на фаянсовых заводах более крупные горны обычно стараются использовать для бисквитного обжига, а горны меньшей кубатуры — для политого, если этому не препятствует направление общезаводского производственного потока.

Типичные горны для бисквитного обжига фаянса, например № 14 и № 15 Кировского завода, имеют ряд особенностей в размерах и соотношении конструктивных элементов, обуславливающих возможность быстрого форсирования обжига в тех случаях, когда

нет оснований ожидать растрескивания и коробления изделий от быстрого выделения влаги. Эти горны, работающие в данное время на обжиге санитарного фаянса, как видно из рис. 88, располагаются в четырехэтажном здании формовочного цеха и имеют общую дымовую трубу, расположенную внутри здания. Дымовая труба с тонкими стенами стоит в более массивной наружной трубе. Кольцевое пространство между внутренней и наружной трубой по идее проекта должно быть использовано на подогрев воздуха, поступающего в формовочный цех для сушки заформованных изделий.

Горячий воздух, получающийся при охлаждении горнов, через боковые вытяжные трубы подается в цех и специальной системой шиберов распределяется по этажам.

Для дальнейшего снижения температуры в период выгрузки горна в своде имеется дополнительный центральный патрубок. Он открывается после снижения температуры горна, примерно, до 200—300° С.

Своды горнов перекрыты тонкими ребристыми стенками, на которых уложен легкий лещодочный пол и установлены стеллажи для сушки. Горячий воздух надсводового пространства также может быть использован для целей отопления цеха. Камера, имеющая объем около 164 м<sup>3</sup> при диаметре в 7,8 м и полной высоте до ключа в 4,4 м, отопляется посредством восьми топок, работающих на дровах. Для получения в крупных камерах равномерного температурного поля, необходимо обращать особое внимание на систему отбора отработанного газа с пода печи.

Как видно на рис. 88, дымовые газы отбираются через подовые отверстия в газосборник большой емкости (диаметром в 5,7 м), что позволяет иметь равномерное разрежение во всех подовых каналах.

Несмотря на большой пролет подового свода, нагрузка которого при бисквитном обжиге фаянсовой посуды временами достигала 600—700 кг/м<sup>2</sup>, под горна при температурах фаянсового обжига не получал больших провисаний и не нуждался в частых ремонтах.

Асимметричное примыкание борова к сборной камере при большой кубатуре последней не оказывает заметного влияния на разрежение в подовых каналах, так как этот газосборник прекрасно выравнивает разрежения на поду, при нормальном сечении подовых каналов. Для равномерного распределения топочных газов в печной камере и устранения мертвых плохо обогреваемых углов, особое внимание должно быть обращено на правильное пропорционирование живого сечения подовых вылетов с площадью обслуживаемой части пода и разными для отдельных участков камеры скоростными напорами и сопротивлениями насадки в направлении движения газов. Эмпирически принято и вполне оправдывается теорией движения газов увеличение живого сечения подовых каналов по отношению к площади пода, по мере приближения к центру камеры. Для горнов данного типа это положение имеет цифровую характеристику, приводимую на стр. 180 в таблице 48.

В горнах № 14 и № 15 удовлетворительный обжиг полевошпатового фаянса на бисквит можно получить в зависимости от качества топлива при повышении температуры до 1200° С в течение 20—25 часов с расходом в среднем 0,7 м<sup>3</sup> дров (теплоспособностью в 3100 кал) на 1 м<sup>3</sup> печной камеры при напряжении колосниковой решетки около 300 кг.

На рис. 89 показаны кривые температур газовой среды и тяги для одного из типичных обжигов санитарного фаянса (умывальные



ниям камеры. Поэтому применение для политого обжига крупных камер, в которых для выравнивания температур потребовалась бы затяжка обжига на более длительный период, вряд ли целесообразно. Политые горны Кировского завода с кубатурой около  $100 \text{ м}^3$  работают вполне удовлетворительно в смысле качественного выхода несмотря на сильный их износ и устаревшую конструкцию.

В виде иллюстрации на рис. 90 приведен чертеж горна № 8, имеющего камеру около  $113 \text{ м}^3$  с диаметром в 6,4 м и высотой до

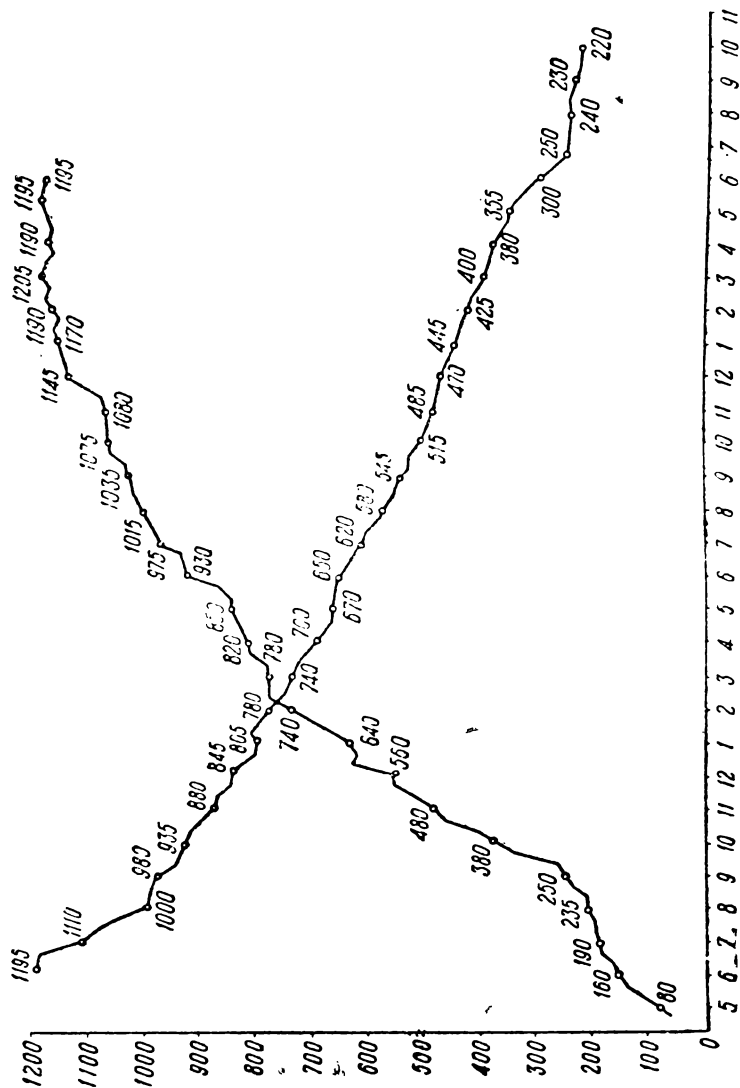


Рис. 89. Кривые температур обжига и охлаждения бисквитного санфайнса

ключа свода в 3,9 м. Горн отопляется дровами и имеет пять топок примитивной конструкции без колосниковых решеток с подачей воздуха через слой топлива. При нормальной влажности дров топки работают удовлетворительно, просты по конструкции и в обслуживании, обеспечивают при регулярной загрузке дровами работу с небольшим и равномерным избытком воздуха и не требуют частого ремонта.

Недостатком этих топок является затяжка обжига при весьма влажных дровах и скоплении на дне шахты золы, которую необходимо периодически удалять, что требует полного прогара топок и удлиняет обжиг. Отбор топочных газов из камеры производится через подовые вылеты, расположенные концентричными кругами, сборную подовую камеру (диаметром в 4,65 м и высотой до ключа свода в 1,35 м) и боров в общую трубу.

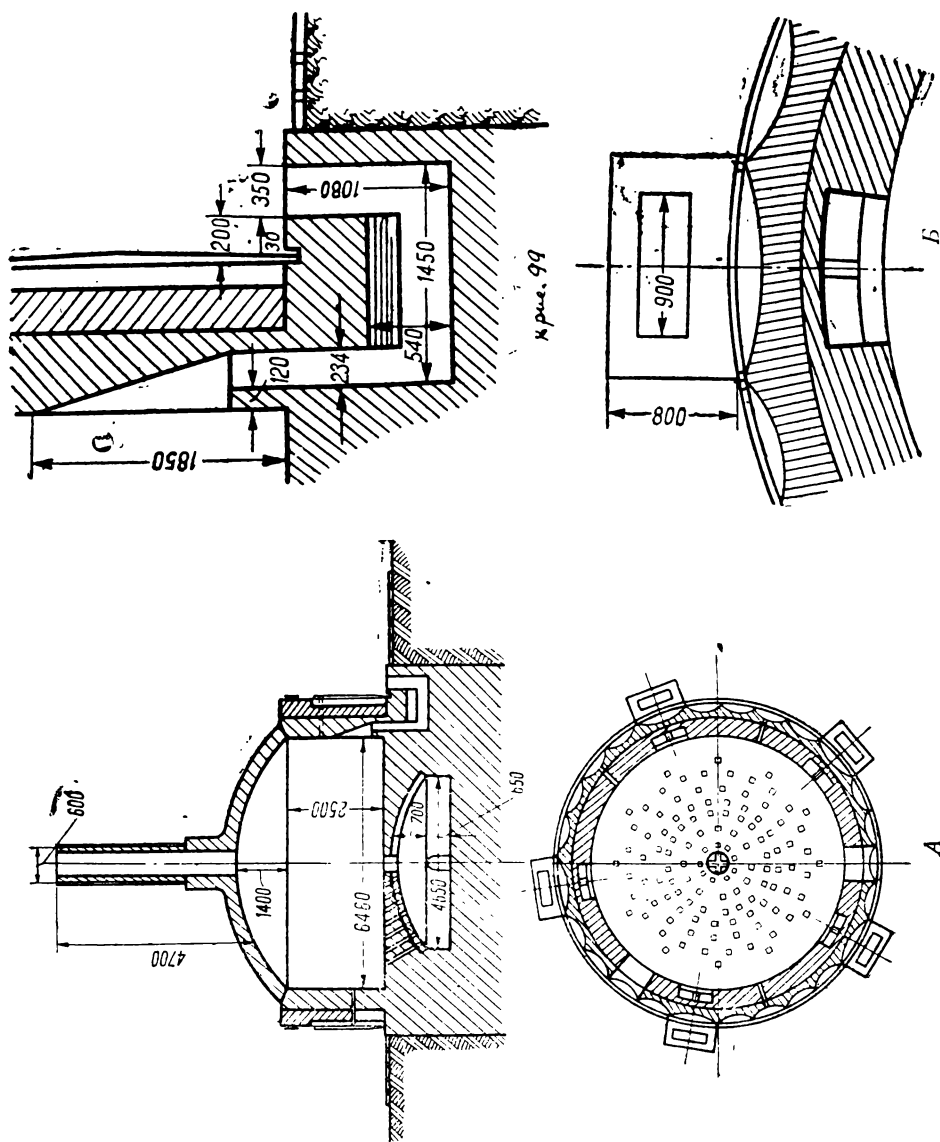


рис. 90. Круглый горн (А) с пультовскими топками (Б) для полного обжига фаянса

Тяга регулируется шиберами, установленными в дымоходе каждого горна. Для охлаждения камеры в центре купола установлена легкая железная труба, футерованная кирпичом, выводящая горячий воздух в атмосферу и сообщающаяся боковым ответвлением с общей магистралью вытяжной вентиляции. Горячий воздух может удаляться в атмосферу, но, как правило, разбавляется присо-

сом холодного воздуха до желательной температуры и направляется в цеха на использование для сушки капсулей, отопления и т. д.

В целях увеличения обрачиваемости и производительности горнов, следует, по возможности, сокращать периоды обжига и охлаждения камеры. Однако, весьма быстрое охлаждение при сосредоточенной подаче холодного воздуха через заборные двери может повлечь растрескивание капсулей и фаянса. Крупные фаянсовые санизделия, например умывальные столы и унитазы, имеющие сложную конфигурацию и неравномерную толщину черепка, особенно чувствительны к резкому охлаждению. Растрескивание санизделий при весьма форсированном охлаждении политых и бисквитных горнов происходит, обычно, в секторах, расположенных против заборных дверей, и служит признаком чрезмерно быстрого их открывания; кирпичная кладка заборных дверей должна разбираться постепенно и в со-

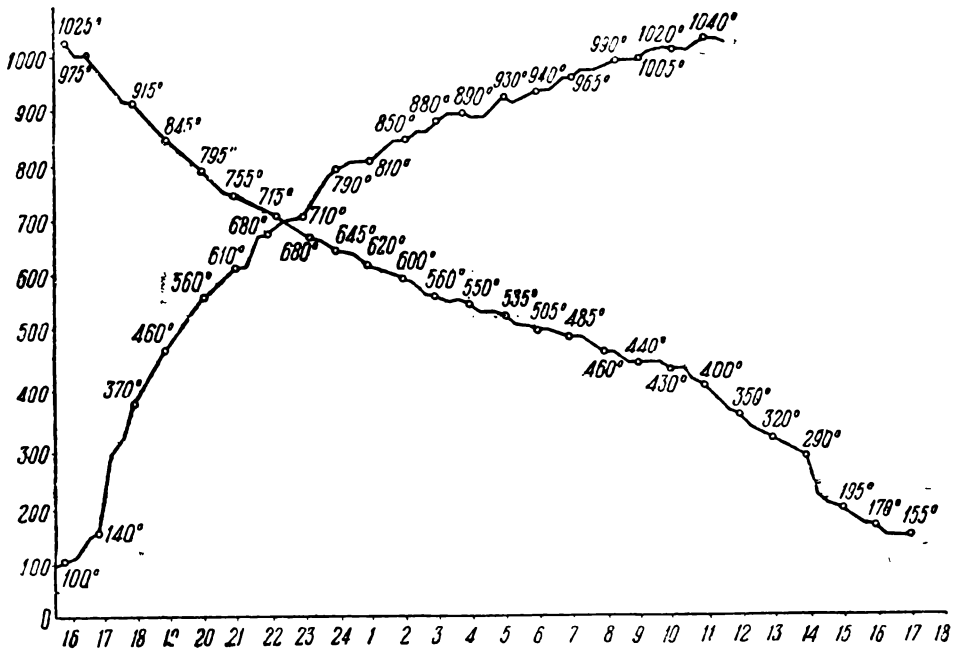


Рис. 91. Кривые температур обжига и охлаждения политого санфаянса

ответствии с установленным для каждого горна расписанием охлаждения.

Потоки воздуха, проходящие при охлаждении печной камеры через топки, слегка подогреваются кладкой топки и, вследствие более равномерного их распределения, обычно, не вызывают повреждения изделий. На рис. 91 показаны кривые обжига и охлаждения политого санфаянса в горне № 8.

Наибольшие трудности при обжиге политого фаянса вызывает достижение равномерности нагрева загрузки по всем сечениям камеры, вследствие небольшой продолжительности обжига, его низкой конечной температуры и большой разности температур пламени и обогреваемых изделий. В связи с этим, регулирование газообмена на периферии и в центре камеры путем надлежащего распределения подовых каналов имеет существеннейшее значение. В таблице 48 приведены

данные о площади сечения подовых каналов и обслуживаемых ими кольцевых участков пода горна № 8 Кировского завода для обжига поли того фаянса, а в таблице 50 — прочие основные размеры.

Однокамерные горны с обратным пламенем, оборудованные топками с колосниковыми решетками, легко приспособляются для обжига на торфе или угле; это требует лишь незначительной переделки топок и соответствующей подготовки ожигальщиков для обслуживания последних.

Ниже, по данным обследования, произведенного Теплотехническим бюро ВСНХ УССР 14 октября 1927 г., приводится описание конструкции и работы двух горнов Будянского фаянсового завода, работавших на угле.

В горне № 14 обжигается фаянсовая посуда на бисквит, а в горне № 11 — политой фаянс. Характеристики указанных горнов приведены в таблице 49.

Таблица 49

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНОВ № 14 и № 11

	Горн № 14	Горн № 11
Объем камеры (полный), в м <sup>3</sup> . . . . .	246	171
Диаметр . . . . . в м . . . . .	7,75	7,10
Высота камеры до замка купола, в м . . . . .	6,40	5,30
Высота загрузки капсулей, в м . . . . .	4,35	4,00
Температура обжига (средняя по пироскопам для разных участков камеры), в °С . . . . .	1 200	1 117
Температура обжига (средняя по пирометрам), в °С . . . . .	1 112	1 046
Средняя продолжительность обжига за квартал в час . . . . .	34	21,4

Более подробные данные о конструктивных размерах и других показателях этих горнов приведены в сводной таблице 50.

Отбор газов с пода в этих печах осуществляется, в отличие от описанных выше горнов Кировского завода, через систему подподовых кольцевых и радиальных каналов. Такой отбор газов через подподовые каналы дает, как правило, менее равномерное разрежение на поверхности пода, чем при наличии газосборной подподовой камеры. Поэтому в горнах для обжига фаянса с невысокой температурой прогрева пода устройство подподовых каналов неудобно, особенно, в виду частого их засорения и затруднительности регулярной очистки от золы, песка и шамота, проваливающихся через подовые отверстия.

Режим работы горнов с большим объемом камеры определяется не только оптимальными кривыми температуры и газовой среды, обусловленными технологическим процессом образования черепка, но и необходимостью выдержать эти кривые по всем сечениям камеры.

По мере увеличения кубатуры печей, повышение температуры, получаемой в разных частях камеры, начинает более резко отступать от заданной кривой обжига. Поэтому приходится ориентироваться на более продолжительный обжиг, обеспечивающий нормальное протекание процесса образования фаянсового или фарфорового черепка.

Форсирование обжига в больших камерах приводит к большой разнице как в темпах повышения температур в различных местах камеры в отдельные отрезки времени, так и в конечных температурах обжига.



Поэтому кривые обжига, приводимые для характеристики работы горнов № 14 и № 11, как и во всех других примерах, характеризуют режим обжига только для контрольных точек камеры и не характеризуют работы печной камеры в целом.

На рис. 92 и 93 приведены кривые температур газовой среды и давлений для отдельных точек камеры.

Режим питания работающих на угле топок, показанный на диаграммах, обеспечивает для данных размеров камер кратковременный (34 час. для камеры в  $246 \text{ м}^3$  и 21,4 час. для камеры в  $171 \text{ м}^3$ ) и неравномерный обжиг, сказывающийся на некотором снижении качества выпускаемой продукции. Наибольшая разница конечных температур для разных участков камеры (вверх и вниз) достигает в горне № 14, примерно,  $100^\circ \text{С}$ , а в горне № 11— $60^\circ \text{С}$ .

При выборе наиболее выгодной для данных условий производства продолжительности обжига, необходимо руководствоваться не только весьма существенными преимуществами ускоренного обжига (в смысле увеличения производительности печей и сокращения расхода топлива), но и его конечными результатами — качеством выпускаемой продукции, определяющим, в конечном счете, эффективность работы предприятия.

Наиболее выгодная продолжительность обжига определяется сопоставлением всех технико-экономических показателей работы печей.

Низкий коэффициент полезного действия однокамерных печей периодического действия обусловлен большими потерями тепла на нагрев массивной печной кладки и с отходящими в трубу дымовыми газами, которые покидают печь при высокой температуре. Температура отходящих газов повышается по мере нагрева насадки камеры, и потому потери возрастают при затяжном обжиге и высокой конечной температуре его. Потери тепла на нагрев кладки и отдачу в окружающую среду зависят не только от режима обжига, но, в значительной мере, от конструкции печи — отношения периметра печи к ее кубатуре, толщины, материала стен и сводов и т. п. факторов.

Для характеристики потерь в таблице 50 (стр. 186 и 187) приведены ориентировочные коэффициенты полезного действия для разных печей в процентах от общего расхода тепла на обжиг.

#### IV. Круглые двухэтажные горны

Большие тепловые потери, получающиеся при обжиге керамических изделий в однокамерных печах, послужили стимулом для изыскания новых типов печей. Высокая температура отходящих газов, неизбежная при обжиге в однокамерных печах, позволяет использовать их еще для обжига при более низких температурах полуфабрикатов и вспомогательных производственных материалов, т. е. утилизировать тепловые отходы (повидимому, отсюда и происходит общепринятый в фарфоровом производстве термин „утильный обжиг“).

Эта задача, как правило, конструктивно разрешается путем постройки второй, а иногда и третьей камер, непосредственно на камере для высокого обжига (двух- и трехэтажные горны). Режим обжига в камерах второго и третьего этажей такого горна зависит от режима работы первой камеры, а также от тепловых потерь и засосов воздуха, получающихся по пути следования отходящих горячих газов из первой во вторую и третью камеры и в большинстве горнов не может быть точно регулирован по заданной кривой. Обжиг во втором и тем более в третьем этажах получается весьма

ПРИБЛИЖЕННЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ И ПОКАЗАТЕЛИ

Наименование	Показатели оптимальной печной камеры по исследованиям Горного Бюро США		Горн № 1 для обжига канализационных труб, работающий на угле, по данным Н. Мансур		Горны № 10 и № 11 для обжига кислотоупорных колец наполнителей (завод „Коминтерн“), работавшие на дровах	
	абс.	в % к площади пода	абс.	в % к площади пода	абс.	в % к площади пода
1. Форма и объем печной камеры, в м <sup>3</sup> . . . . .	—	—	кр. 363	—	кв. 77	—
2. Диаметр и высота до замка свода, в м . . . . .	—	—	10 × 6	—	5 × 5 × 3,9	—
3. Количество топков . . . . .	—	—	10	—	4	—
4. Суммарная площадь колосниковых решеток или заменяющих ее площадей, в м <sup>2</sup>	8,2	12,5	8,9	9,2	6,4	25,6
5. Суммарный объем топочного пространства, в м <sup>3</sup> . . . . .	—	—	6,7	—	6,4	—
6. Площадь пода камеры, в м <sup>2</sup>	65,5	100	84,8	100	25	100
7. Суммарная площадь подовых отверстий, в м <sup>2</sup> . . . . .	2,3—3,3	3,5—5,0	5,85	6,9	0,84	3,36
8. Суммарная площадь сечения собирательных дымовых каналов, в м <sup>2</sup> . . . . .	—	—	1,6	1,9	1,26	5,04
9. Сечение главного дымохода (борова), в м <sup>2</sup> . . . . .	0,66	1,0	0,83	0,97	0,75	3,00
10. Площадь сечения дымовой трубы, в м <sup>2</sup> . . . . .	0,66	1,0	—	—	—	—
11. Высота дымовой трубы, в м . . . . .	10,5—13,5	—	21	—	—	—
12. Загрузка продукции в период обследования на 1 м <sup>3</sup> печной камеры, в кг . . . . .	—	—	172	—	195	—
13. Загрузка капсулей и других огнеупорных припасов в период обследования на 1 м <sup>3</sup> печной камеры, в кг . . . . .	—	—	нет	—	344	—
14. Конечная температура обжига (средняя по камере) в °С . . . . .	—	—	1200	—	1280	—
15. Продолжительность обжига в период обследования в час . . . . .	—	—	67	—	45	—
16. Расход натурального топлива на 1 м <sup>3</sup> печной камеры, в кг . . . . .	—	—	73	—	385	—
17. Расход условного топлива на 1 м <sup>3</sup> печной камеры, в кг . . . . .	—	—	57	—	142	—
18. Технический коэффициент полезного действия (отношение тепла, израсходованного на нагрев изделий и капсулей, к общему расходу тепла) . . . . .	—	—	0,222	—	0,191	—

## РАБОТЫ ОДНОКАМЕРНЫХ ГОРНОВ С ОБРАТНЫМ ПЛАМЕНЕМ

Горны № 15 и № 14 Кировского завода для бисквитного обжига санфаянса (умывальные столы и т. п.), работающие на дровах		Горн № 8 Кировского завода для политого обжига санфаянса, работав- ший на дровах (топки пультовые)		Горн № 14 Будянского завода для бисквитного обжига фаянсовой посуды, работающий на угле		Горн № 11 Будянского завода для политого обжига фаянсовой посуды, работающий на угле	
абс.	в 0,0 к площади пода	абс.	в 0,0 к площади пода	абс.	в 0,0 к площади пода	абс.	в 0,0 к площади пода
кр. 164	—	кр. 103	—	кр. 246	—	кр. 171	—
$7,8 \times 4,4$ 8	—	$6,5 \times 3,9$ 5	—	$7,75 \times 6,40$ 12	—	$7,10 \times 5,30$ 10	—
7,3	15,02	1,9	5,79	8,4	17,87	7	17,50
6,2 48	— 100	8 32,75	— 100	6 47	— 100	5 40	— 100
0,8	1,66	0,9	2,74	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
0,88	1,83	0,62	1,73	—	—	—	—
1,13	—	1,11	—	—	—	—	—
35,5	—	20	—	—	—	—	—
65	—	58	—	156	—	75	—
240	—	240	—	252	—	278	—
1250	—	1020	—	1200	—	1117	—
24	—	18	—	36	—	21	—
260	—	119	—	88	—	69	—
115	—	53	—	82	—	64	—
0,114	—	0,193	—	0,204	—	0,206	—

переменным как по конечным температурам, так и по характеру температурной кривой и газовой среды.

В связи с этим, во вторых этажах, обычно, обжигается фарфор на бисквит и капсулы. Конечная температура обжига фарфора на бисквит, при нормальных условиях работы нижней полнотой камеры и достаточной продолжительности обжига, может колебаться в пределах 850—1000°С без заметного влияния на качество выпускаемой продукции. Поэтому двух- и трехэтажные горны получили преимущественное распространение на фарфоровых заводах.

При обжиге фаянса на бисквит и по полноте, такие колебания температур недопустимы; поэтому двухэтажные горны в фаянсовом производстве, как правило, не используются. Только в виде исключения на заводах с комбинированным фарфоровым и фаянсовым производством можно встретить обжиг фаянса в двухэтажных горнах. Обжиг в третьем этаже, в виду большого запаздывания в повышении температуры и низкого ее конечного значения, недостаточен для нормального обжига капсул или фарфора на бисквит. В прежнее время, когда фарфоровые горны работали с длительным циклом (малой оборачиваемостью) выравнивание температур во втором и третьем этажах достигалось уже по окончании обжига путем передачи горячим воздухом тепла из первой камеры через центральные вылеты во второй и третий этажи с торможением его выхода из дымовой трубы. При этих условиях в третьем этаже удавалось обжигать небольшие количества фарфора на бисквит, размещая его стопками на уступах свода второй камеры. Снижение оборачиваемости, а следовательно, и производительности горнов не может ничем компенсироваться. Поэтому третьи камеры, обычно, не используются и в настоящее время в целях освобождения места снимаются при капитальных ремонтах горнов.

Крупные двухэтажные горны являются старейшими печами фарфорового производства и потому в процессе развития, хотя и крайне медленного, уже сформировалось несколько основных типов и значительное количество разнообразнейших, иногда мало обоснованных, конструкций.

Наиболее ранним типом горна является двухэтажный горн прямого действия с так называемыми „очелочными“ топками и без канализованного пода, сохранившийся и работающий до настоящего времени на Дулевском фарфоровом заводе (№ 5).

Основным отличием этого горна (рис. 94) является отсутствие выложенного из огнеупорных материалов пода. Столбы капсул с полнотой фарфором устанавливаются прямо на грунт, посыпанный песком.

Пламя из расположенных на периферии топок подается прямо в загрузку капсул к центру горна, подымается потом кверху, уходит через сводовые отверстия первой камеры во второй этаж и проходит через загрузку второй камеры. Из последней горячие газы уходят непосредственно в дымовую трубу.

Отбор газов из полнотой камеры горна регулируется площадью сечения сводовых каналов. Размеры и количество этих каналов подбираются с таким расчетом, чтобы обеспечить работу полнотой камеры на положительном давлении, так как в этом случае можно рассчитывать на полное ее заполнение пламенем и получить достаточно равномерный обжиг по всем сечениям камеры. Если площадь сводовых каналов делается больше нормальной, то пламя не заполняет камеры и устремляется из топок кратчайшими путями вдоль стен камеры

и ближайших кругов капсельной ставки. Сечение периферийных сводовых каналов оказывается в этом случае достаточным, а их сопротивление прохождению газов настолько малым, что через эти каналы проходит подавляющая часть газов и средний конус капсельной ставки не дожигается до заданной температуры или требует для достижения последней недопустимо большой продолжительности обжига. Загрузка полнотой камеры „очелочного“ горна и ведение процесса обжига требуют большого навыка со стороны горновщика и ожигальщиков, и только в опытных руках такие горны могут давать фарфор удовлетворительного качества. При охлаждении камер воздух подается через топки и загрузочные двери и омывает капсулы восходящими потоками.

К преимуществам горнов этого типа следует отнести простоту конструкции, долговечность печей, минимальные затраты на капитальный и текущие ремонты, а также невысокий расход топлива по сравнению с другими типами двухэтажных фарфоровых горнов. Небольшие затраты на ремонт обусловлены устойчивостью не имеющих боковых каналов рубашки камеры и отсутствием канализированного пода, требующих в других горнах частых ремонтов и смены. Малый расход топлива объясняется непосредственной подачей факела в загрузку камеры и меньшими потерями на нагрев пода и боковых стен по сравнению с другими типами двухэтажных горнов.

Средняя продолжительность обжига фарфоровой посуды при работе на торфе с нормальной влажностью колеблется около 25—28 часов, при влажном же топливе обжиг затягивается до 35—50 часов и выше.

Следующий этап в развитии двухэтажных горнов представляет собою горн с подачей пламени через подовую решетку и восходящим его движением в полнотой и утильной камерах. В этих печах (рис. 95) топочные газы подаются из топок, размещенных ниже уровня пода горна, в полнотую камеру через радиальные и вертикальные подовые каналы, обогревают загрузку полнотой камеры, дальше проходят через сводовые каналы во второй этаж горна, где обжигается фарфор на бисквит, и удаляются в атмосферу через дымовую трубу. Горячие газы все время поднимаются вверх, вследствие чего эти печи называются горнами с прямым пламенем.

Устройство в поду горна радиальных каналов с вертикальными выходами в полнотую камеру имело целью поднять пламя из топок в камеру не только через периферийные столбы капсулей, как это имело место в „очелочном“ горне, но и через центр загрузки камеры, причем одновременно предполагается и возможность регулирования подачи газов в разные места камеры путем уменьшения или увеличения подовых вылетов в отдельных пунктах камеры. Помимо регулирования подачи пламени в камеру приемами конструктивного порядка, при обжиге этих горнов применяется еще и смещение очага горения к центру камеры путем заброски топлива (поленьев дров или кусков торфа) непосредственно в радиальные каналы. Необходимо, однако, отметить, что эти мероприятия являются лишь частичным решением вопроса о равномерном нагреве загрузки камеры, так как, согласно гидравлической теории, газы в восходящих потоках не обладают способностью к саморегулированию распределения их по вертикальным каналам между столбами капсулей, и потому этот процесс является сложной функцией от величины заполнения камеры, работы распределительных подовых и сводовых решеток и отдельных топок горна. Площадь сечения каналов сводовой ре-

шетки, их размещение и соотношение между суммарными площадями сечений подовых и сводовых каналов имеют решающее значение при разработке конструкций и определяют распределение пламенного потока в литой камере и равномерность обжига в ее разных сечениях.

Сопротивление движению газов, возникающее в каналах сводовой решетки в прямых горнах, определяет направление восходящих пламенных потоков и скорость газообмена в отдельных пунктах литой камеры. Уменьшение сечения каналов в центре свода или на периферии приводит к соответствующему торможению выхода горячих газов на этих участках камеры, уменьшению газообмена и понижению температур обжига для загруженной в этих пунктах продукции,

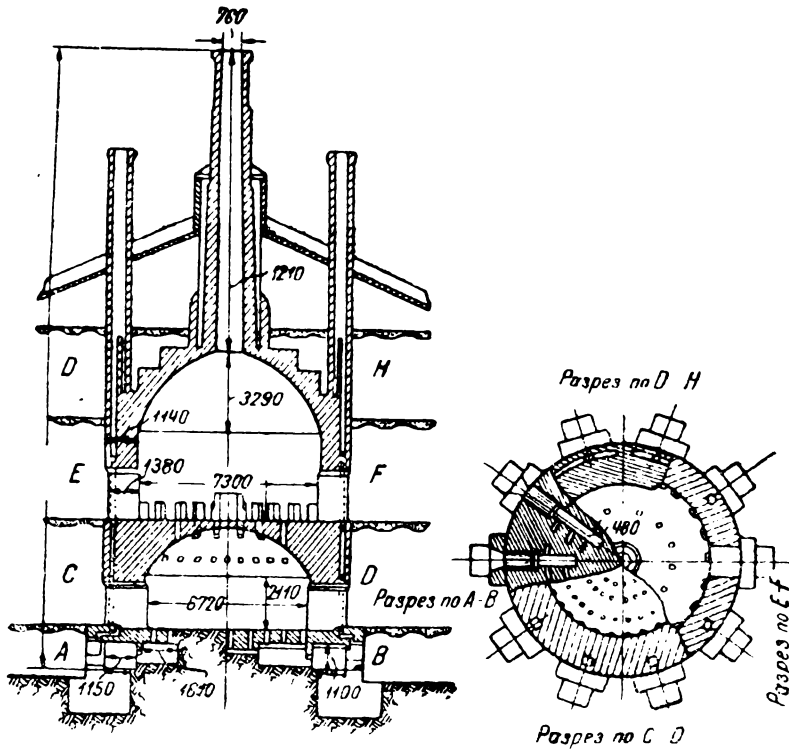


Рис. 95. Двухэтажный горн с восходящим пламенем и подовыми топками

так как горячие газы будут направляться по линии наименьшего сопротивления в более широкие каналы. Неравномерности обжига в значительной мере будет способствовать и неизбежный в этом случае больший нагрев широких каналов между столбами капселей и соответственно повышенный гидравлический напор в этих каналах (по сравнению с отстающими в нагреве смежными каналами).

Весьма важное значение правильного распределения каналов сводовой решетки и отношения величины их сечения к обслуживаемой части кубатуры литой камеры подчеркивается в практике постройки прямых горнов устройством специальных патрубков в утильной камере над выходящими в нее каналами сводовой решетки, что имеет целью предохранить сечение этих каналов от закрывания капселями с бисквитным фарфором и засорения кусочками шамота, т. е. стабилизировать

оптимальные конструктивные размеры сводовой решетки от фактического изменения в процессе эксплуатации горна. Нормальное заполнение полнотой камеры пламенем возможно в прямых горнах только при положительном давлении.

Необходимо отметить, что управление восходящим потоком газов, даже при идеальном размещении каналов в своде полнотой камеры и весьма умелом регулировании обжига путем перемещения очага горения в подовых каналах и фокуса горения в полнотой камере, весьма затруднительно, так как принцип работы прямых горнов находится в противоречии с гидравлической теорией.

Хороший качественный выход фарфора и достаточная равномерность температурного поля полнотой камеры в конце обжига объясняются значительной продолжительностью последнего, обеспечивающей выравнивание температуры отдельных столбов капсул за счет теплопередачи лучеиспусканием от весьма раскаленного пода и между отдельными столбами капсул, а также искусством горновщиков, которые, обычно, работая на определенных горнах в течение ряда лет, в совершенстве изучают все их особенности, что дает им возможность регулировать работу горнов, конструкция которых в принципе неверна, плотностью загрузки печной камеры и специальными приемами обжига.

При охлаждении горнов этого типа воздух подается через топку и загрузочные двери и удаляется восходящими потоками через центральные сводовые отверстия. Обжиг в горнах с прямым пламенем требует большого внимания, так как при наличии на поду хотя бы минимального разрежения, измеряемого долями миллиметра водяного столба, неаккуратное обслуживание топок в период их загрузки топливом и очистки от шлака сопровождается засосом в полноту камеру холодного воздуха, что может дать ряд разнообразных дефектов на обжигаемом фарфоре, например, желтизну и пузыри (вздутия черепка).

Другим недостатком горнов с прямым пламенем являются большие потери тепла на нагрев кладки пода, которая поглощает тепло пламени при максимальной температуре последнего. Наиболее ценная часть тепла пламени (при высоком перепаде температур между пламенем и продукцией) как раз уходит на нагрев пода и теплопередачу в землю, тогда как в других типах горнов периодического действия факел пламени направляется кратчайшими путями непосредственно в загрузку печной камеры, что дает ускорение обжига и повышение коэффициента полезного действия печи.

Однако, в пропускании топочных газов через подовую решетку имеются и некоторые положительные стороны. Отсутствие непосредственно лобового воздействия концентрированного факела пламени обеспечивает большую устойчивость капсул, оборачиваемость которых в горнах с прямым пламенем выше, чем в печах, где пламя непосредственно из топок направляется на загруженные в горне капсулы.

Подавляющая масса золы остается на стенках радиальных и вертикальных подовых каналов, столбы капсул ошлаковываются в меньшей степени, чем в других горнах, и при разгрузке камеры легче отделяются друг от друга, давая меньше боя. При общем повышении оборачиваемости капсул нижние их ряды, находящиеся под максимальной нагрузкой, в горнах с прямым пламенем подвергаются, обычно, воздействию наиболее горячих газов и потому работают в наиболее тяжелых условиях.

Недосмотр в подаче воздуха и получение острого пламени с высокой температурой сразу и в первую очередь отражается на устойчивости нижних капселей и приводит к „подсаду“ отдельных столбов капселей, а иногда и к завалу отдельных участков загрузки печной-камеры, что, понятно, влечет за собой увеличение боя и количества деформированных изделий.

Обжиг бисквита в утильной камере горнов с прямым пламенем получается при нормальных конструктивных размерах печи вполне удовлетворительным.

Неправильное ведение обжига и неправильный режим давлений во всей системе горна могут приводить к смещению фокуса горения во вторую камеру и пережогу утиля. Продолжительность обжига фарфора в горнах с прямым пламенем на дровах и торфе при политой камере с кубатурой порядка 100—130 м<sup>3</sup> колеблется в зависимости от условий (температуры обжига, качества топлива) в пределах 25—35 часов. Эксплуатационные недостатки горнов с прямым пламенем, главным образом, трудности ведения обжига, требующие от обслуживающего персонала большого навыка и напряженного внимания, привели к внедрению в керамическое производство различных систем двухэтажных печей с обращенным пламенем. Как видно из рис. 96, в наиболее распространенных горнах этого типа пламя из топочных вылетов подается непосредственно в загрузку политой камеры и в свободное подсводовое пространство; поворачивая затем вниз, оно проходит через каналы между столбами капселей и подовые отверстия в сборные каналы, размещенные в толще пода политой камеры. Отработавшие горячие газы через сборные и вертикальные каналы, обычно, размещенные в стенах камеры между топочными вылетами, и через подовые каналы второго этажа подаются в утильную камеру. Обращенный поток печных газов в политой камере дает, при правильной конструкции основных элементов горна, хорошее заполнение пламенем политой камеры и весьма упрощает проведение обжига.

Большинство горнов этого типа работает во втором этаже по принципу восходящего потока газов, которые, поступая из подовых вылетов, проходят через загрузку утильной камеры и удаляются в трубу. Поэтому для данной группы печей название „горны с обратным пламенем“ является недостаточно обоснованным. При большой продолжительности обжига и естественном охлаждении с удалением горячего воздуха из политой камеры через утильную камеру и вытяжные трубы, период нагрева фарфора, обжигаемого на бисквит, получается достаточно продолжительным и обеспечивает полное обезвреживание и нормальную прочность продукции. При форсировании обжига и охлаждения печей на втором этаже, действие отработавших газов с высокой температурой получается очень коротким, так как в начальный период обжига их тепло в значительной части расходуется на нагрев пода политой камеры и вертикальных каналов. Это обстоятельство, вместе с недостатками распределения восходящих потоков горячих газов и плохим заполнением ими утильной камеры, часто приводит к неравномерному обжигу бисквита (утиля) с преобладанием недожога.

Конструктивным недостатком горнов типа, показанного на рис. 96, является малая устойчивость футеровки стен и купола политой камеры, обусловленная прокладкой в стенах горна топочных вылетов и вертикальных газоходов. Нагрев до высокой температуры сводиков (kozyрьков), перекрывающих топочные вылеты, при сильном их шла-



ковании летучей золой ведет к отваливанию в этих местах кладки стен, а периодический разогрев каналов для отработавших газов приводит к выпучиванию футеровки.

Помимо быстрого разрушения и частой замены футеровки стен, а также и провисания куполов, особо вредным последствием быстрого износа кладки является нарушение размеров топочных вылетов и вертикальных каналов, приводящее к расстройству газообмена и неравномерному обжигу в прилегающих к ним участках политой камеры.

В эксплуатации горны с обратным пламенем имеют преимущество перед горнами с прямым пламенем в отношении продолжительности обжига и расхода топлива, уступая им по расходу капселей, особенно быстро выходящих из строя у топочных вылетов от лобового удара пламени и шлакования.

Конструктивные и эксплуатационные недочеты действующих на наших заводах круглых двухэтажных горнов, имеющих, как правило, весьма почтенный возраст, особенно резко стали выявляться в последние годы, когда фарфоро-фаянсовая промышленность СССР стала на путь форсированного развертывания выпуска продукции (путем повышенной загрузки наличного оборудования и постройки дополнительных агрегатов). В первую очередь потребовалось повысить оборачиваемость основного оборудования фарфоро-фаянсовой промышленности — печей периодического действия — за счет сокращения продолжительности обжига и охлаждения, а также загрузки и разгрузки без ухудшения качества выпускаемой продукции. При разрешении этой задачи пришлось на многих заводах конструкции, рассчитанные на работу с оборачиваемостью в 5 раз в месяц при хорошем топливе (сухие дрова и торф), приспособлять как к оборачиваемости до 8—10 раз в месяц, так и к изменившимся условиям топливоснабжения (иногда влажные дрова и частичный переход на мазут). В процессе переделки круглых горнов были разработаны и практически испытаны разнообразные конструкции горнов с обратным пламенем и разные типы топочных устройств. Хотя и в данное время еще нет твердо установившихся типов круглых двухэтажных горнов, однако, опыт, полученный в процессе освоения новых конструкций, и достаточно глубокое изучение их работы сформировавшимися за последнее время в керамической промышленности кадрами заводских теплотехников, уже позволяют надеяться на благоприятное разрешение задачи создания наиболее рациональной конструкции в ближайшее время. Конструкторы печей должны добиться: а) максимальной быстроты и равномерности обжига при сохранении высокого качества продукции и при наиболее простом и легком обслуживании топочных устройств, б) быстрого охлаждения камер, в) минимального расхода топлива, г) сокращения до минимума простоев печи и затрат на капитальные и текущие ремонты и разрешения некоторых других задач чисто местного значения.

Одним из новых типов двухэтажного горна является конструкция, спроектированная и осуществленная инженером-теплотехником Шутым на заводе „Пролетарий“ (Новгородского р.) при капитальном переустройстве круглого горна № 1. До реконструкции горн № 1 никакими конструктивными особенностями не отличался от обычных горнов этого типа, т. е. имел политую камеру с обращенным движением пламени, а утильную — с восходящим, и обычные топки с вылетами непосредственно в политую камеру. После реконструкции, как видно из рис. 97, и политая и утильная камеры работают с обращенным движением пламени.

Из каждой топки пламя поступает в самостоятельный распределительный канал, размещенный по дуге периферийной окружности политой камеры под ее подом, и через вертикальные подовые вылеты подается в загрузку и под свод политой камеры. Омывая столбы капселей, печные газы опускаются в центральные части камеры и удаляются через размещенные здесь отводящие вертикальные и радиальные подовые каналы в центральную трубу.

Отработанные газы подаются центральной трубой под свод утильной камеры и, омывая загрузку последней, направляются вниз к периферии, где собираются боковыми каналами, заложенными

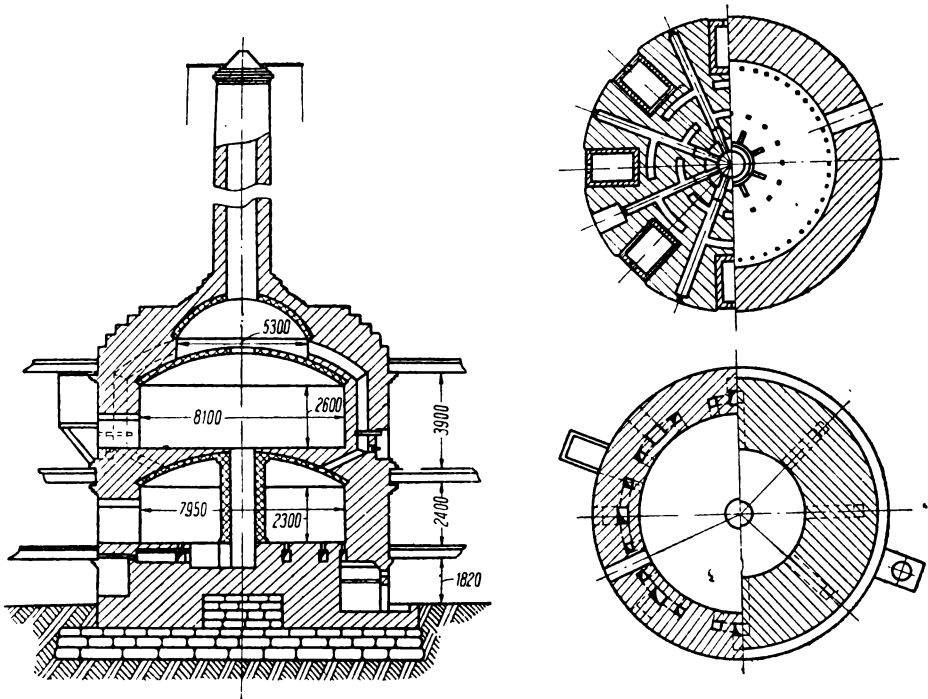


Рис. 97. Двухэтажный горн с обратным пламенем и подовыми топочными вылетами

в стенах утильной камеры и выходящими в надсводовую газосборную камеру. Из сборной камеры газы удаляются в дымовую трубу горна.

Для охлаждения политой камеры в ее своде устроены каналы, сообщающиеся при открывании шиберов с боковыми каналами утильной камеры и газосборником. Воздух подается в политую камеру через топки и загрузочные двери, проходит восходящими потоками через загрузку камеры и через сводовые отверстия, боковые каналы утильной камеры и газосборник, удаляется в дымовую трубу или систему искусственной вентиляции. Утильная камера охлаждается воздухом, поступающим через ее загрузочные двери восходящими потоками, которые направляются через центральное сводовое отверстие в газосборник, где горячий воздух утильной и политой камер смешивается и удаляется дымовой трубой или вентиляторами (в зависимости от температуры воздуха и принятой системы охлаждения).

При обжиге горна центральное сводовое отверстие утильной камеры, обычно, закрывается шибером и только в случае достижения предельной температуры обжига шибер открывается, газы из политой камеры направляются навывлет в дымовую трубу и дальнейший обжиг утиля задерживается на достигнутой температуре.

Горн описанной конструкции, как показала практика его эксплуатации, имеет ряд достоинств, выделяющих его из ряда горнов других конструкций. Правильное разрешение вопроса о направлении потоков печных газов при обжиге и воздуха при охлаждении обеспечивает получение равномерного повышения и понижения температур в обеих камерах и соответствующее сокращение рабочего цикла. Несмотря на относительно крупные размеры камер, легко достигается трехсуточная оборачиваемость при равномерном обжиге, хорошем выходе фарфора и относительно низком расходе топлива. Раздельный подвод и удаление воздуха дают возможность одновременно охладить политую и утильную камеры, тогда как в других печах горячий воздух политой камеры проходит через утильную камеру, чем весьма задерживается охлаждение последней и затрудняется одновременная разгрузка обеих камер.

Как показала практика эксплуатации, отсутствие каналов в стенах и футеровке политой камеры и небольшое их количество в своде дают значительное увеличение прочности горна и уменьшают затраты времени и средств на капитальные и текущие ремонты. Подача пламени из топок через ряд небольших отверстий ( $0,18 \times 0,18$  м) ослабляет ударное действие факела на первый круг капсулей и задерживает часть летучей золы в топке, распределительном и вертикальных каналах, чем обеспечивается повышение устойчивости и оборачиваемости капсулей, примерно, на 30% по сравнению с печами, где практикуется устройство обычного топочного вылета с большим сечением. Помимо этого, распределение подачи топочных газов по всей периферии горна способствует большей равномерности обжига. Значительная теплоотдача в землю требует при этой конструкции топочных вылетов более тщательной их теплоизоляции.

Устройство отвода печных газов, отработавших в утильной камере, через каналы, расположенные в стенах, является наиболее простым конструктивным разрешением этого вопроса. Закладка каналов в стенах второго этажа, в виду низкой температуры отходящих газов, не приводит к быстрому разрушению стен, как в политых камерах, и потому является здесь вполне допустимой.

Обжиг фарфора до температур порядка  $1400-1450^{\circ}\text{C}$ , даже на дровах средней влажности, является трудной задачей, так как снижение температуры топок, получающееся при заброске дров, дает в камере волнистую кривую температур, не достигающую заданной температуры обжига. Поэтому для устранения этих срывов в подъеме температурной кривой конструируются специальные топки, в которых обеспечивается более устойчивое горение с меньшими колебаниями температуры топочных газов. Примером такой конструкции является горн № 5 завода им. Ломоносова, реконструированный инж. Д. А. Ярыз и хорошо справляющийся с обжигом ответственных фарфоровых изделий на дровах с влажностью до 30%.

Топки этого горна (рис. 98) рассчитаны на сжигание метровых дров, однако, колосниковая решетка, выполненная в виде шамотового свода с отверстиями, имеет длину в 1450 мм и рассчитана на догорание угля у порога для обеспечения устойчивого очага горения и предотвращения вредного влияния засовов холодного воздуха при

заброске дров, когда разгоревшиеся дрова на передней части решетки перекрываются дровами свежей загрузки. Наклон решетки обеспечивает легкое перемещение части обгоревших дров в заднюю часть топки. По местным условиям (тесное помещение и близость грунтовых вод) не представилось возможным понизить уровень колосниковой решетки ниже пода политой камеры, в связи с чем камера работает в нижней части с разрежением порядка 1—2 мм вод. ст., что является нежелательным в отношении равномерности распределения температур; однако, при небольшой камере — 48 м<sup>3</sup> — высокое расположение топок заметного влияния на равномерность обжига не оказывает. Показатели работы горна № 5 приведены в сводной таблице 51.

Проблема нормализации газового потока в обеих камерах двухэтажного горна в период его обжига и охлаждения разрешалась

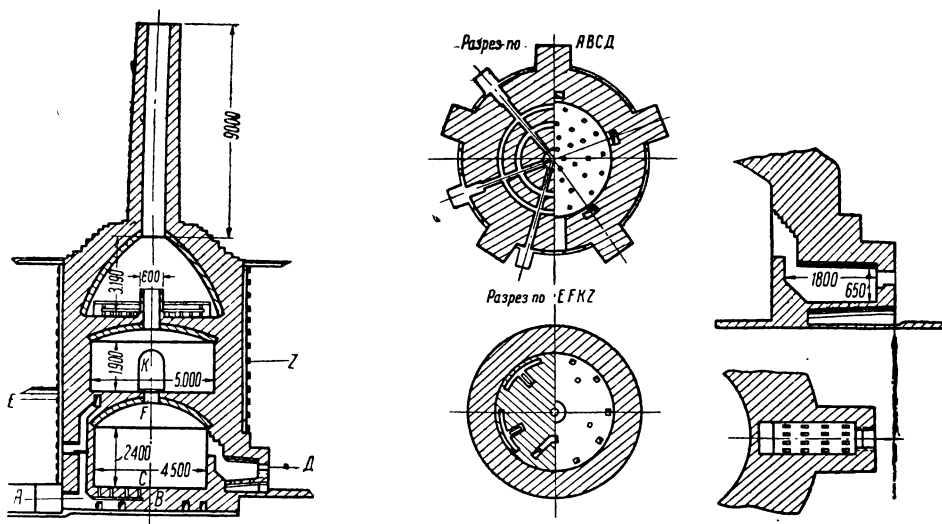


Рис. 98. Трехэтажный горн для высокого обжига фарфора с удлиненными топками

конструкторами печей в разных вариантах. Бюро теплотехнических и металлургических конструкций (ныне Мосгипромез) для обеспечения нормального потока печных газов впервые в СССР применило при реконструкции и постройке фарфоровых горнов с полугазовыми топками центральную трубу в политой и утильной камере. Работы проф. В. Е. Грум-Гржимайло в области проектирования печей для фарфоро-фаянсового производства послужили толчком для внедрения научно-обоснованных методов их конструирования и эксплуатации.

В проекте горна, построенного на Первомайском заводе (рис. 99), вопросы движения печных газов были впервые (для данного типа печей) проработаны на основе гидравлической теории и получили в фарфоровом производстве практическую проверку, вполне подтвердившую правильность приведенных расчетов и возможность перехода от чисто эмпирических приемов конструирования, господствовавших до последнего времени, к научно-обоснованным методам. Выполненные по ряду проектов конструкции показали свою рациональность, причем мелкие конструктивные недочеты были скорректированы в порядке очередных ремонтов горнов без каких-либо перебоев

в работе печей. Недостатком конструкции горна № 4 Первомайского завода является довольно сложная система газоходов и двойных водов, перекрывающих политую и утильную камеры горна. Топочные газы в этом горне поступают в политую камеру через распределительное кольцо и вертикальные подовые каналы.

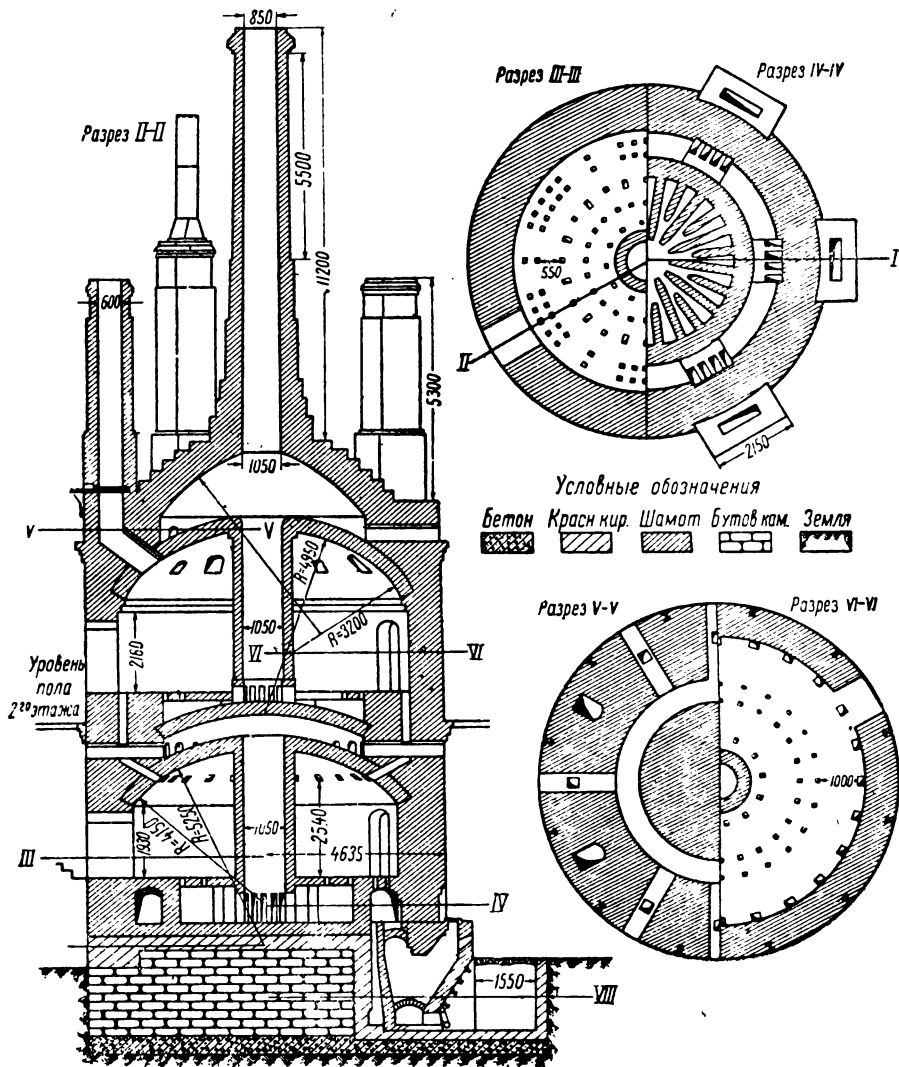


Рис. 99. Двухэтажный горн с полугазовыми топками и центральным отводом печных газов

Задачей распределительного кольца является выравнивание подачи газов по всей периферии камеры в случае неравномерной работы топок. При значительном гидравлическом напоре и сопротивлении подовых каналов недостаточная подача полу газа или воздуха из отдельной топки компенсируется смежными топками и тем обеспечивается равномерность нагрева камеры. Однако, в устройстве общего для всех топок распределительного канала имеется и суще-

ственное неудобство. При повышении сопротивлений подовых каналов против той или иной топки, что может всегда иметь место вследствие сужения, запыливания шлаком и случайного по недосмотру перекрывания каналов капселями, нет возможности получающегося при этом отставание в нагреве прилегающей части горна ликвидировать усилением подачи газов из соответствующей топки (форсировкой), так как эффект этой подгонки ступеневывается кольцевым распределительным каналом. Таким образом, наличие кольца дает возможность получить более ровный обжиг при нормальных и равномерных сопротивлениях во всех подовых каналах и весьма затрудняется выравнивание температуры в камере, если практически в процессе эксплуатации получились отклонения от расчетных сопротивлений в отдельных участках кольцевого канала. Вопрос о кольцевой подаче топочных газов в политую камеру является еще недостаточно проработанным и нуждается в дополнительном изучении.

Преимущества распределенной подачи пламени через небольшие каналы в смысле повышения оборачиваемости капселей были выше уже отмечены и в горне № 4 при полугазовых топках дали еще более разительные результаты, так как в данном случае капсели не шлакуются и при разгрузке разбираются легко и без повреждений.

По выходе из кольца печные газы проходят на разных высотах через загрузку политой камеры и удаляются через подовые отверстия, сборные радиальные каналы и центральную трубу в промежуточную подсводную камеру. Из этой камеры газы через боковые каналы, расположенные по периферии пода утильной камеры, подаются для обжига утиля, проходят такой же путь, как и в политой камере, и через центральную трубу и промежуточную надсводную камеру уходят в дымовую трубу. Как в политой, так и в утильной камере, обжиг производится при нисходящем направлении печных газов. При охлаждении камер холодный воздух поступает в политую камеру через топки и загрузочные двери, омывает загрузку камеры и восходящими потоками удаляется через сводовые боковые каналы (при открытых шиберах) и утильную камеру в дымовую и специальные охлаждающие трубы. Прохождение горячего воздуха из политой камеры через утильную, в известной мере, задерживает охлаждение последней и потому является недочетом данной системы канализации печных газов.

Воздух для охлаждения утильной камеры подается в загрузочные двери, проходит между столбами капселей и удаляется через боковые сводовые отверстия в дымовую трубу и специальную вытяжную систему.

Полугазовые топки, являясь промежуточным типом между обычными и газовыми топками, могут использоваться и в обычных двухэтажных фарфоровых горнах.

К преимуществам полугазовых топок, устроенных в описанном горне № 4 и других печах, относятся постоянный режим горения, устойчивая температура печных газов и удобство загрузки топок, исключая возможность попадания в печную камеру холодного воздуха при открывании топочных дверей.

Не менее важным достоинством полугазовых топок является возможность управления процессом горения путем регулирования подачи первичного и вторичного воздуха, обеспечивающее равномерную и желательную атмосферу (окислительную или восстановительную) в печной камере с определенным избытком или недостатком воздуха.

При работе топок с колосниковыми решетками в печной камере неизбежно получается перемежающаяся атмосфера и для создания окислительного или восстановительного процесса необходимо работать либо с высоким избытком воздуха, либо допускать большую неполноту горения, что приводит к большим тепловым потерям в печи и к затяжке обжига во времени. Полугаз может сжигаться за счет вторичного воздуха в любой точке горна, поэтому перенос фокуса горения из первой камеры во вторую при полугазовых топках легко осуществляется путем подачи полугаза и вторичного воздуха во второй этаж; ввиду невысокой температуры полугаза — порядка 900—1000° С — потери тепла (физического) при прохождении полугаза через каналы невелики, и потому во втором этаже легко достигаются температуры политого фарфорового обжига. При подаче пламени во второй этаж из обыкновенных топок, вследствие высокой его температуры, тепловые потери в каналах столь высоки, что получить в этой камере высокие температуры (для фарфора порядка 1300—1350° С) почти невозможно и, во всяком случае, связано с большой затяжкой обжига и быстрым разрушением каналов для подачи пламени, а также прилегающих к ним стен и сводов. Проблема использования двух этажей для политого обжига фарфора приобретает особо важное значение, когда для отдельных видов продукции, например, для изоляционного фарфора, упраздняется утильный обжиг, или на заводе вводится выработка изделий, вообще не нуждающихся в предварительном обжиге на утиль. В этом случае, можно получить увеличение выпуска завода за счет приспособления утильных камер для обжига при высоких температурах, т. е. производить в них дополнительный дожиг до заданной температуры после окончания работы на отработавших газах политической камеры. Необходимость срочного увеличения выпуска телеграфных изоляторов на Дулевском заводе побудила реконструировать устаревший и весьма изношенный горн для обжига политого фарфора в обеих камерах.

Проект реконструкции горна был выполнен бюро теплотехнических и металлургических конструкций (Мосгипромез), причем как при проектировании, так и в дальнейшем при перестройке и эксплуатации, рамки старой конструкции горна и условия производства, в известной мере, мешали полному воплощению новых идей в конструировании горнов для обжига фарфора. Горн (рис. 100) оборудован полугазовыми топками для торфа и работает в обеих камерах по принципу обращенного пламени. В начальный период топки работают на первую камеру, а вторая камера обогревается газами, отработавшими в первой камере. Полугаз из топок вышеописанной конструкции поступает в кольцевой подподовый канал, где смешивается с подогретым воздухом, поступающим через каналы, заложенные в стенках шахты.

Из кольцевого канала грубо перемешанные полугаз и горячий воздух подаются через вертикальные подовые каналы в политую камеру. При прохождении через вертикальные каналы меняются скорости движения газов и возникают вихри, способствующие более совершенному перемешиванию газов и ускорению процесса горения, который, по идее конструкции, протекает вблизи от подовых вылетов.

В дальнейшем часть печных газов подымается к своду и, обогравившись вниз, проходит через центральную часть камеры к подовым газосборным каналам, другая часть направляется к этим каналам более короткими путями.

Отработанные газы через газосборные подовые каналы поступают в подподовую уравнительную камеру, из которой по радиальным и вертикальным каналам направляются в распределительный подподовый кольцевой канал второй камеры.

Вертикальными подовыми каналами горячие газы распределяются по периферии второй камеры, омывают ее загрузку и обращенными потоками возвращаются к центральной части пода, откуда через окна центральной газосборной трубы, расположенной у пода, удаляются в дымовую трубу.

При описанном движении газов заканчивается обжиг политого фарфора в первой камере и нагрев второй камеры доводится, примерно, до температуры обжига утиля. При этом дополнительные каналы, предназначенные для дожига загрузки второй камеры при

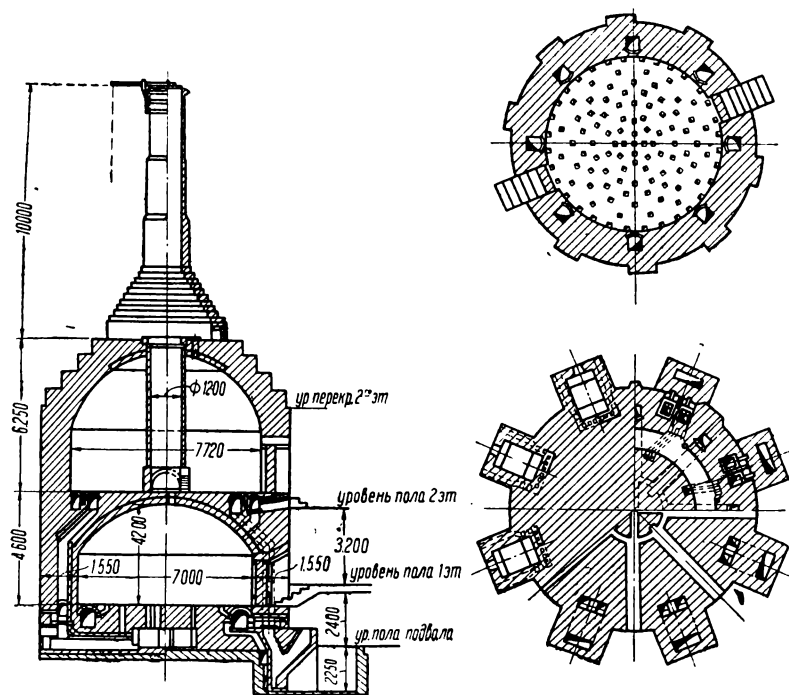


Рис. 100. Двухэтажный горн с полугазовыми топками и политым обжигом фарфора во втором этаже

более высокой температуре и для охлаждения горна, перекрыты шиберами.

Топки горна имеют по два топочных вылета: один из них предназначается для подачи газа в первую камеру и выходит в ее подовый кольцевой канал, второй предназначается для подачи газа во вторую камеру (при дожиге) через вертикальные каналы, используемые в первой стадии обжига для подачи отработавших газов. Оба вылета перекрываются шиберами и работают поочередно.

По окончании обжига первой камеры, открываются шибера сводовых каналов, сообщающих камеру первого этажа с воздушным кольцевым каналом, расположенным в поду второго этажа рядом с кольцевым газовым каналом, и, таким образом, горячий воздух,



получающийся при охлаждении политой камеры, поступает во вторую камеру, чем создаются хорошие условия для сжигания полу-газа и быстрого повышения температуры.

С окончанием обжига в первой камере, в полугазовых топках перекрываются шиберами левые вылеты и открываются правые, через которые газ подается в газовое кольцо второго этажа.

Полугаз и горячий воздух из кольцевых каналов через боковые вылеты выходят в общие вертикальные подовые каналы, благодаря чему происходит их хорошее перемешивание и быстрое завершение реакций горения. В дальнейшем печные газы проходят такой же путь, как и отработавшие газы первой стадии обжига, и удаляются в дымовую трубу.

В период эксплуатации горна выяснилась практическая возможность дожига загрузки второго этажа с помощью полугазовых топок, преимуществва последних в этом отношении перед другими типами топок, а также некоторые конструктивные недочеты горна и сделаны попытки их устранения при очередных ремонтах.

Интенсивное перемешивание полугаза с горячим воздухом в кольцевом канале в подовых вылетах первой камеры и в подовых вылетах второй камеры приводит к развитию высоких температур у пода и местных пережогов нижних капселей, размещенных вблизи пламенных вылетов. Поэтому главное внимание авторов проекта и работников фабрики было обращено на изменение конструкции каналов и пламенных вылетов в целях замедления процесса перемешивания полугаза с горячим воздухом и сгорания, т. е. максимального удлинения факела горения и перенесения его в загрузку печной камеры.

Сначала было изменено расположение газового и воздушного кольца и подовых вылетов во втором этаже (рис. 101). Как видно из чертежа, воздушное кольцо при этом было размещено под газовым кольцом, благодаря чему получилась возможность дать два ряда подовых вылетов. Конструкции газовых и воздушных каналов и сопряжений их с подовыми вылетами способствуют слоистому движению газов, дают слабое их перемешивание и потому процесс горения, в основном, переносится в камеру, что вместе с более равномерным распределением пламенных вылетов на поду обеспечивает большую устойчивость нижних капселей против деформаций и равномерное температурное поле в камере.

В целях задержки горения полугаза в кольцевом канале первой камеры, при капитальном ремонте было изменено направление каналов, подающих воздух, с таким расчетом, чтобы, по возможности, обеспечить слоистое (ламинарное) движение полугаза и воздуха в кольцевом канале и перенести интенсивное смешение полугаза со вторичным воздухом и фокус горения в загрузку камеры. Как видно из рис. 102, для этой цели в кольцевом канале были устроены выступы *a*, отклоняющие струю полугаза влево при подаче горячего воздуха из кольца в камеру через подовые вылеты.

Как показало изучение работниками Дулевского завода работы горна, после указанного изменения конструкции каналов, благодаря этим изменениям, были устранены местные пережоги нижних капселей и повысился сортовой выход изоляторов. Необходимо еще отметить, что свод, перекрывающий газосборную камеру первого этажа (подподовую), ввиду большой загрузки при высокой температуре (около 1300° С), дал в процессе эксплуатации постепенное провисание. Поэтому при капитальном ремонте пода Теплобюро фабрики заменило газосборную камеру системой горизонтальных и вертикаль-

ных каналов, размещенных в массивной толще пода. При этом, конечно, увеличилась прочность пода, но, одновременно с этим, устройство длинных вертикальных каналов (весьма трудно очи-

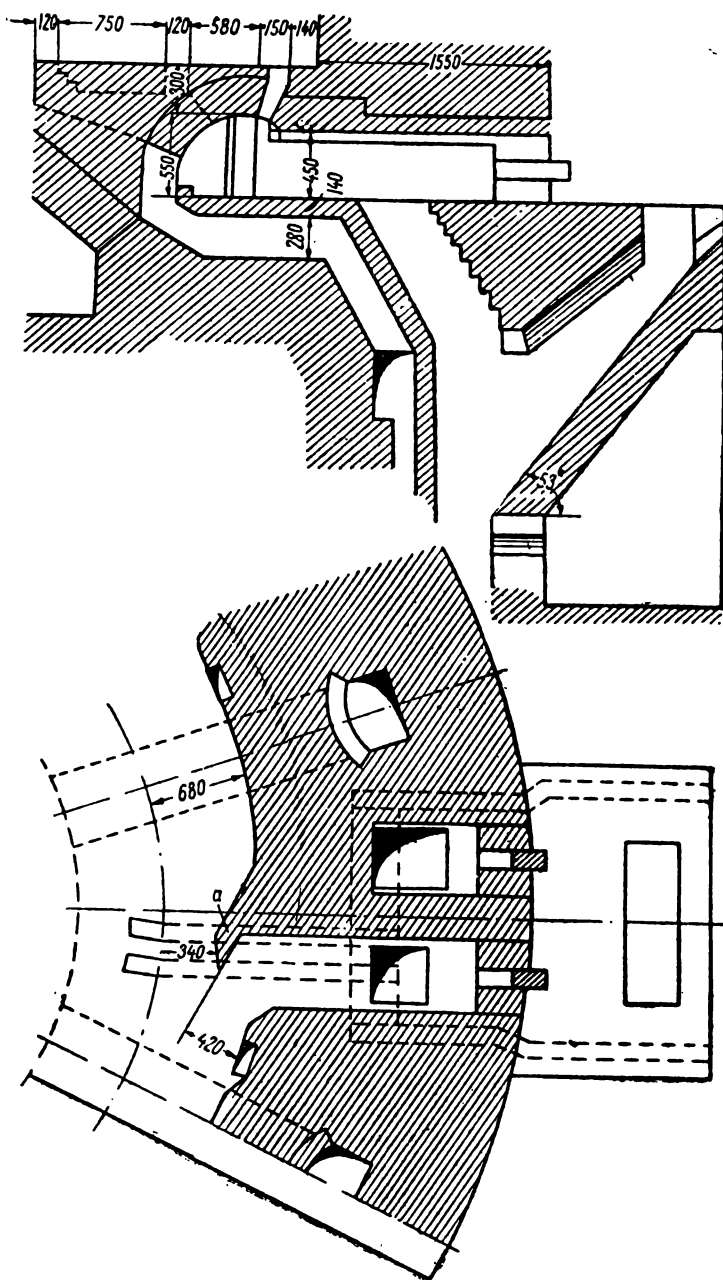


Рис. 102. Конструкция топочного вылета полуغازовой топки и подовых каналов

щаемых от наплывов и выпучин) значительно ухудшило газообмен в камере политого обжига и послужило причиной затяжки сжига.

Устройство массивного пода особо неблагоприятно отразилось на обжиге второй камеры, так как значительная часть тепла отработавших газов поглощается аккумуляцией пода. Практическая проверка сопротивлений капсельной загрузки камеры показала необходимость закладки двух периферийных рядов подовых каналов, выводящих отработавшие газы из литой камеры, так как нормальные пути печных газов, обеспечивающие равномерный обжиг всей загрузки горна, проходят от вылетов из газового кольца через загрузку камеры и центральные подовые отверстия в газосборную камеру. Закладка двух крайних рядов отверстий давала хорошие конструктивные решения для постройки более устойчивого свода с меньшим радиусом и пролетом без увеличения сопротивления подовых каналов и связанной с этим задержки обжига. Намеченный вариант воздушной рекуперации тепла печных газов (рис. 103), путем устройства в поду вторых каналов, перекрытых тонкими шамотовыми лещадками и выводящих горячий воздух в кольцо для смешения с полугазом, не был утвержден в окончательном проекте горна.

Одной из причин, побудивших отказаться от идеи рекуперации тепла, явилась, повидимому, опасность присоса воздуха через неплот-

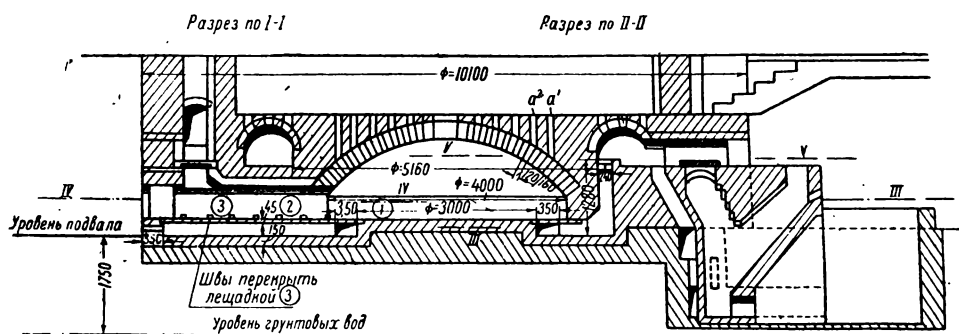


Рис. 103. Конструкция подовых каналов горна с частичной рекуперацией тепла

ности лещодочных перекрытий рекуперативных каналов, что грозило нарушить нормальную и бесперебойную тягу в горне.

Необходимо отметить условия работы этого горна и полученные практические результаты. Задача обжига литой фарфора в двух этажах путем дожига загрузки верхней камеры полугазом за счет горячего воздуха, получаемого при охлаждении литой камеры, была в горне разрешена с хорошим коэффициентом полезного действия. При нормальной влажности торфа и обжиге в первом и втором этажах литых изоляторов до температуры порядка 1320—1350° С расход топлива, по данным за первое полугодие 1931 г., составлял в среднем 32—33 т условного топлива на две камеры или 0,126—0,127 т на 1 м<sup>3</sup> литой камеры; тогда как в горне с обратным пламенем, при обжиге в первом этаже литых изоляторов, а во втором этаже — утиля, расход за это же время составил 29,45 т условного топлива или 0,234 т условного топлива на 1 м<sup>3</sup> литой камеры.

Выгодность в тепловом отношении обжига литых по-сырому изоляторов в обеих камерах и дожига загрузки второго этажа, при равноценном качестве получаемой продукции, очевидна. Особого вни-

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ ДВУХЭТАЖНЫХ КРУГ

Наименование	Горн № 5 Дулевского завода с прямым пламе- нем и очелочными топками (без канализованного пода); работает на торфе по обжигу хозфарфора		Горн № 12 Дулевского завода с прямым пламенем и канализован- ным подом; работает на торфе по обжигу хозфарфора	
	абс.	на 100 м <sup>3</sup> печной камеры	абс.	на 100 м <sup>3</sup> печной камеры
Диаметр пода I этажа, в м . . . . .	6,70	—	7,40	—
Площадь . I . . . . . в м <sup>2</sup> . . . . .	35,24	31,14	43,00	30,40
Объем камеры I этажа в м <sup>3</sup> . . . . .	112,6	—	141,0	—
Диаметр пода II этажа в м . . . . .	7,10	—	8,00	—
Площадь . II . . . . . в м <sup>2</sup> . . . . .	39,6	36,2	50,3	36,6
Объем камеры II этажа, в м <sup>3</sup> . . . . .	147,6	—	215,0	—
Тип топок . . . . .			с к о л о с	
Количество топок . . . . .	10	—	12	—
Суммарная площадь колосниковых решеток, в м <sup>2</sup>	6,23	5,60	7,50	5,31
Живое сечение (суммарное) колосниковых ре- шеток, в м <sup>2</sup> . . . . .	1,98	1,77	2,00	1,42
Суммарный объем топочного пространства, в м <sup>3</sup>	7,10	6,34	8,80	6,25
Суммарная площадь топочных вылетов в поли- тую камеру, в м <sup>2</sup> . . . . .	1,15	1,62	2,75	1,95
Суммарная площадь газоотводящих подовых или сводных каналов, в м <sup>2</sup> . . . . .	0,54	0,48	1,59	1,13
Суммарная площадь сечения газосборных подо- вых каналов политой камеры, в м <sup>2</sup> . . . . .	—	—	—	—
Суммарная площадь сечения вертикальных кана- лов, отводящих газы в утильную камеру, м <sup>2</sup>	—	—	—	—
Суммарная площадь вылетов в утильную ка- меру, в м <sup>2</sup> . . . . .	0,54	0,48	1,43	1,01
Суммарная площадь газоотводящих каналов из утильной камеры, в м <sup>2</sup> . . . . .	—	—	0,442	0,317
Сечение вертикальных газоходов утильной ка- меры, в м <sup>2</sup> . . . . .	—	—	—	—
Площадь сечения дымовой трубы, в м <sup>2</sup> . . . . .	0,25	0,23	0,442	0,317
Высота дымовой трубы от уровня колосниковой решетки и свода II камеры, в м . . . . .	23/12,0	—	22,5/9,6	—
Сечение дополни ельных каналов политой камеры для отвода воздуха при охлаждении, в м <sup>2</sup> . . . . .	0,87	0,78	—	—
Сечение каналов для отвода воздуха при охлажде- нии утильной камеры, в м <sup>2</sup> . . . . .	—	—	0,442	—
Конечная температура обжига политой камеры (средняя), в °С . . . . .	1350	—	1350	—
Расход условного топлива на 1 м <sup>3</sup> политой камеры, в т . . . . .	0,19	—	0,24	—

ЛЫХ ГОРНОВ И ГЛАВНЕЙШ ИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИХ РАБОТЫ

Таблица 51

Горн № 3 с обратным пламенем, работает на торфе по обжигу изоляторов (Дулевский завод)		Горн № 1 завода „Пролетарий“ (Новгородского р.) с обращенным пламенем конструкции инж. Шутого, работающий на дровах		Горн № 3 Дмитровского завода с прямым пламенем и канализованным подом, работающий на дровах		Горн № 5 завода им. Ломоносова с обратным пламенем для высокого обжига, работающий на дровах (3-этажный)		Горн № 2 Дулевского завода с полугазовыми топками системы проф. Грум-Гржимайло, работающий на торфе по обжигу изоляторов	
абс.	на 100 м <sup>3</sup> печной камеры	абс.	на 100 м <sup>3</sup> печной камеры	абс.	на 100 м <sup>3</sup> печной камеры	абс.	на 100 м <sup>3</sup> печной камеры	абс.	на 100 м <sup>3</sup> печной камеры
6,70	—	7,90	—	6,70	—	4,50	—	7,00	—
35,2	29,6	49,00	37,20	35,20	31,50	15,9	32,0	43,4	34,8
118,9	—	132,0	—	116,0	—	46,5	—	124,5	—
7,20	—	8,10	—	7,30	—	5,00	—	7,72	—
40,7	34,2	51,5	39,0	41,7	36,0	19,6	41,5	46,8	37,6
206,0	—	165,0	—	208,0	—	42,3	—	188,0	—
н и к о в о й р е ш е т к о й								полугазовая	
10	—	8	—	10	—	5	—	8	—
8,39	7,05	12,60	9,55	9,7	8,35	4,55	9,78	—	—
2,4	2,02	2,10	1,59	2,5	2,16	1,14	2,45	—	—
10,00	8,05	12,60	9,55	12,10	10,40	4,10	8,83	21,00	16,09
2,31	1,95	1,84	1,39	1,90	1,64	0,88	1,89	1,40	1,12
1,45	1,22	1,00	0,76	2,00	1,72	0,53	1,14	1,44	1,16
—	—	1,00	0,76	0,87	0,75	—	—	—	—
—	—	0,95	0,72	—	—	—	—	—	—
1,87	1,57	0,95	0,72	—	—	0,52	1,12	1,19	0,957
0,442	3,57	0,95	0,72	—	—	0,54	1,16	1,28	1,03
—	—	1,75	1,33	—	—	—	—	1,13	0,907
0,442	0,357	1,1	0,83	0,45	0,39	0,39	0,84	1,13	0,907
21,2/8,52	—	23,8/12,3	—	25	—	19,1	—	21,0	—
—	—	0,76	0,57	—	—	0,48	1,03	0,785	0,63
—	—	0,78	—	общий газоход		общий газоход		—	—
1350	—	1350	—	1350	—	1450	—	1350	—
0,26	—	0,18	—	0,24	—	0,29	—	—	—

мания заслуживает то обстоятельство, что переход на безутильный обжиг изоляторов был проведен без предварительного установления необходимого режима обжига, а совмещение освоения новой конструкции и нового режима обжига весьма усложнило эксплуатацию печи, и потому конечные результаты работы горна с дожигом верхней камеры не являются окончательными и требуют дополнительной проверки с устранением привходящих факторов.

В производстве фарфоровых высоковольтных изоляторов, обычно, не применяется предварительный утильный обжиг и потому две нижние камеры трехэтажных горнов используются для параллельного или последовательного обжига политого фарфора, а третья — верхняя камера — для обжига капселей.

По этому типу на изоляторных заводах, начиная с 1927 г., была проведена по инструкциям, разработанным инж. А. Т. Ильманом с участием инж. Е. Г., Соловьева А. А. Щукина и В. В. Кортнева перестройка действующих и постройка новых горнов на жидком топливе.

На рис. 104 показана в виде примера одна из конструкций горнов с мазутными топками, применяемых на заводе им. Артема для обжига подвесных изоляторов. В этом горне для увеличения срока службы каналы, отводящие дымовые газы из нижней камеры, выведены из кладки стен и выполнены в виде самостоятельных круглых труб 1, обтянутых, во избежание засосов, 2-миллиметровым железом. Трубы футерованы огнеупорным легковесным (пористым) кирпичом. Снизу трубы присоединяются к радиальным подподовым каналам 2 и имеют смотровые люки 3 для очистки последних. Вверху трубы с помощью колен 4 присоединяются к верхней камере (третьего этажа), где отработавшими газами обжигаются капсели.

Дымовые газы из камеры второго этажа через радиальные подовые каналы 5 и центральную трубу 6 также направляются в камеру третьего этажа.

В другой конструкции горна дымовые газы из камеры второго этажа могут отводиться через боковые выносные трубы по способу, принятому для первого этажа.

Обе камеры отапливаются самостоятельно мазутными топками 7 и 8. Мазут распыляется обычно воздушными форсунками системы „Эрит“ с давлением воздуха от 150 до 250 мм.

Восемь топок (при объеме каждой камеры около 80 м<sup>3</sup>) расположены в кладке стен горна и отделяются от печной камеры решетчатыми щитами 9 для более равномерного распределения топочных газов в камере и выравнивания температуры обжига по высоте. Для отвода дымовых газов горн имеет железную трубу 10, футерованную огнеупорным кирпичом. У основания трубы имеется шамотный шибер 11 для регулирования тяги.

В описанном горне достигается обжиг подвесных изоляторов до температуры 1350° С в течение, примерно, 32 часов.

Охлаждение камеры до температуры в 60° С достигается в течение 24—30 часов, в зависимости от мощности вентиляционной установки и атмосферных условий. Преимуществом этой конструкции горна является малый износ горна, вследствие большей устойчивости стен, не ослабленных вертикальными каналами.

Отраслевой конференцией фарфоро-фаянсовой промышленности РСФСР установлены следующие эксплуатационные показатели для круглых фарфоровых горнов:

Продолжительность обжига при влажности топлива до 40%

Кубатура горнов в м <sup>3</sup>	Продолжительность обжига в часах
до 60	22
от 60 до 80	24
„ 80 „ 100	26
„ 100 „ 120	28
„ 120 „ 140	32
„ 140 „ 150	34

Продолжительность охлаждения, в зависимости от мощности действующих вентиляционных установок от 32 до 45 часов.

Загрузка и выгрузка горновых камер с мелким ремонтом установлена, в среднем, до 10 часов.

В последние годы, для устранения замеченных недостатков в работе круглых торнов, а также в целях использования жидкокалорийного топлива, на Дмитровском, Дулевском и др. заводах по проектам Оргфарфорстекло (инж. Гельман, Солдатов, Кортнев) была проведена реконструкция горнов с хорошими результатами, что указывает на возможность дальнейшего сокращения продолжительности обжига и расхода топлива.

Охлаждение горнов также можно ускорить устройством более мощной вентиляции. В отношении термической стойкости фарфоровые изделия, охлаждающиеся в капсулах, могут выдержать быстрое охлаждение и основными препятствиями для ускорения охлаждения горнов являются более быстрый износ печей и капсул, а в отдельных случаях—необходимость бесперебойного обогрева формовочных цехов горячим воздухом, получающимся при охлаждении горнов.

## V. Круглые двухэтажные горны на газообразном топливе

Широкое применение разных видов газообразного топлива в непрерывно действующих печах и большие преимущества управления термическими процессами в газовых печах возбудили интерес к вопросу о переводе на газовое отопление печей периодического действия, работающих, преимущественно, на твердом или жидком топливе. Наибольшие удобства ожидаются от перевода на газообразное топливо круглых печей для обжига фарфора. Несомненная легкость регулирования подачи топлива и воздуха в газовые топки, а также регулирования состава среды в печной камере (от окислительной до резко восстановительной), чистота получаемого в газовой топке, свободного от золы и не шлакующего капсулы пламени являются наиболее крупными преимуществами газового отопления. Однако, при переводе промышленных печей периодического действия на газовое отопление необходимо считаться и с возникающими затруднениями, которые, повидимому, и являются причиной недостаточного внедрения этого вида топлива даже при внешне благоприятных предпосылках газификации.

Наиболее крупным препятствием для использования газа в периодических печах является отсутствие горячего воздуха для сжигания газа, исключаящее при высоких температурах обжига фарфора и оглеупоров возможность применения бедного генераторного газа, который при регулярном питании топков горячим воздухом в непрерывно действующих печах обеспечивает температуры обжига порядка 1350°С и выше.

Проблема освоения богатого газа в керамических (в проекте Мариупольского комбината) и других промышленных печах тесно связана с развитием металлургии—основного потребителя кокса—

и связанных с нею коксовых заводов, дающих богатый коксовый газ. Для выяснения возможности и выгоды обжига фарфора на богатом газе были проведены интересные опыты с газовым обжигом фарфора в круглом горне завода Тильш в Вальденбурге.

Перед началом испытаний была проведена предварительная теоретическая проработка намечаемых методов газового обжига. При этом в основу расчетов были положены кривые температуры и газовой среды, полученные при обычном обжиге фарфора каменным углем.<sup>1</sup>

Общая продолжительность обжига была намечена около 24 часов при конечной температуре в 1450°C. Так как температура горения газа при теоретическом расходе воздуха достигает 1900—1950°C, что недопустимо в начальный период обжига, когда пламя воздействует на чуть подогретые капсулы и фарфор, то при разогреве горна работа газовых горелок была отрегулирована с избытком воздуха, дающим снижение температуры пламени до 550°C.

Регулирование температуры газов и обжигаемых изделий в печной камере производилось путем изменения подачи газа и воздуха, согласно предварительно разработанной таблицы „теплосодержание — температура“ Розена и Фелинга и предварительных расчетов. Измерение температур в камере и анализ газов (содержание CO<sub>2</sub> и CO и характеристика избытка или недостатка воздуха) дают возможность, регулируя подачу газов и воздуха, регулировать обжиг. Однако, при всех удобствах управления обжигом на газе, непрерывное регулирование вентилей является ответственной операцией и требует весьма квалифицированного обслуживания. Этот недостаток работы печей периодического действия не зависит от системы топок и свойств топлива. Он является неизбежным дефектом процесса, протекающего в печах периодического действия.

Фарфоровый двухэтажный горн завода Тильш, в котором производились опыты обжига фарфора на газовом топливе, имеет кубатуру в 71 м<sup>3</sup> и 9 обычных топок с колосниковыми решетками для сжигания угля, которые были приспособлены для газовых горелок. Газ в топку подается по трубопроводам диаметром в 80 мм в свету, ответвляющимся от кольцевого распределительного трубопровода диаметром в 150 мм, опоясывающего горн и присоединенного к регулятору давления газовой магистрали. Задачей регулятора является снижение высокого давления в подводящих к печи трубопроводах от 0,7—1 ат (избыточного давления) до 14—17 мм давления вод. ст. в распределительном кольцевом трубопроводе. Воздух в топку подается вентилятором с производительностью в 10 000 м<sup>3</sup> в час через распределительный кольцевой трубопровод размером в 350 × 450 мм и подводится с боков каждой топки двумя трубопроводами диаметром в 140 мм (рис. 105).

Давление воздуха равняется 24 мм вод. ст. Стремление к низкому давлению воздуха и газа вызывается необходимостью обеспечить спокойное горение и мягкое пламя с догоранием его внутри печной камеры. В целях распределения пламени и устранения острых его языков смесительная камера отделена от печной огнеупорной решеткой, имеющей 26 отверстий размером в 35 × 45 мм. Эта решетка служит для перемешивания газа с воздухом, раздробляет факел на 26 мелких языков и, являясь катализатором горения и раскален-

<sup>1</sup> Ditrich. Parzellenbrennofen mit Ferngasofen. „Keramische Rundschau“, №№ 20, 21, 22; 1931.



ным экраном, должна предотвратить возможность затухания топок в начале обжига, когда топки должны работать с возможно низкой температурой, и от неизбежных при этом хлопков (взрывов) газа. Подача газа регулируется трехдюймовыми вентилями, а воздуха — герметическими шиберами. На случай порчи мотора или воздушного вентилятора, предусмотрены отверстия для инъекции воздуха газовой струей (в виде временной меры).

Между 17 ноября и 12 декабря 1929 г. было проведено три опытных обжига. По данным Дитриха, все три опыта дали хороший фарфор, но в первых двух обжигах имелись недостатки эксплуата-

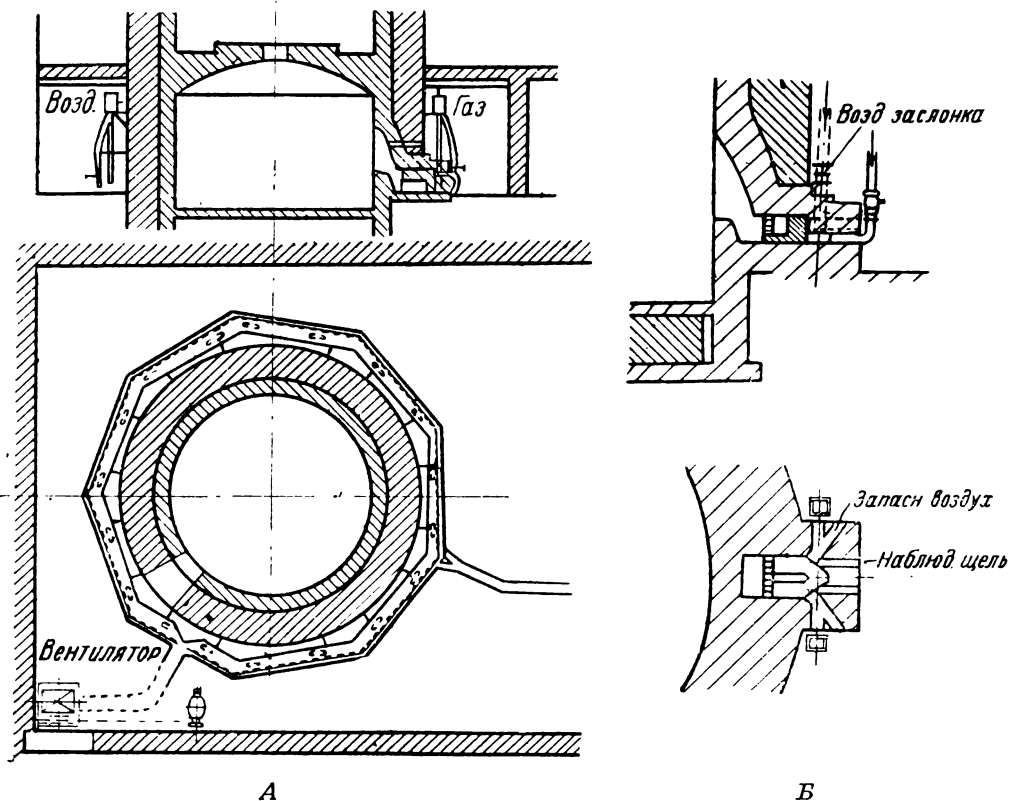


Рис. 105. Крупный горн (А) с газовыми топками (Б)

ционного порядка и перерасход газа. Третий обжиг дал наиболее благоприятные показатели. Автор статьи ссылается на благоприятную характеристику фарфора, данную лабораторией Зегера и Крамера. Брак на 1,2% ниже, чем при обычном на заводе Тильша обжиге в туннельных печах. Бой капсулей снизился до 80 кг на 1 м<sup>3</sup> печи против обычного в круглых печах 120 кг на 1 м<sup>3</sup>. Это объясняется чистотой пламени и равномерностью разогрева.

Расход газа с калорийностью  $Q = 4400 \text{ кал/м}^3$  на 1 кг выпущенной продукции эквивалентен расходу угля при обжиге фарфора на угле. Ниже приводятся более подробные данные, характеризующие обжиг фарфора на газовом топливе (в описанной выше печи, объемом в 71 м<sup>3</sup>).

1. Продолжительность обжига . . . . .	29,5 час.	
2. Загрузка камеры политым фарфором . . .	3850 кг	
3. Капселя и пр. припас . . . . .	22159 "	
4. Капселя, обжигаемые во втором этаже . .	33148 "	
5. Заполнение полнотой камеры 42,6 м <sup>3</sup> . . .	60 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	
6. Теплотворная способность 1 м <sup>3</sup> газа . . .	4400 кал	
7. Общий расход газа . . . . .	13790 м <sup>3</sup>	
8. Расход газа на 1 кг продукции . . . . .	3,57 м <sup>3</sup>	
9. . . . . 1 м <sup>3</sup> камеры первого этажа	194 м <sup>3</sup>	
10. Средний состав дымовых газов:	Начальный период обжига	Конечный период обжига
CO <sub>2</sub> . . . . .	6,99 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	7,89 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
O <sub>2</sub> . . . . .	6,50 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	1,88 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
CO . . . . .	0,85 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	2,80 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
11. Средняя температура дымовых газов . . .	264° С	910° С
12. Полезный расход тепла при полнотом обжиге фарфора с капселями и при бисквитном обжиге . . . . .	32,6 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	
13. Потери тепла от неполного сгорания и с отходящими дымовыми газами . . . . .	17,08 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	
14. Остаточный член (остальные потери) . . .	50,32 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	
15. Технический коэффициент полезного действия . . . . .	32,6 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	

Отмеченные опыты позволяют считать обжиг фарфора на богатом высококалорийном светильном газе возможным и при питании топок холодным воздухом. При наличии блокированной работы нескольких периодических печей с использованием горячего воздуха смежных печей для газового обжига, повидимому, возможно использование для некоторых производств и менее теплопроизводительных видов газового топлива при наличии соответствующих экономических предпосылок. К преимуществам газового отопления печей относятся:

- 1) легкость управления газовыми топками;
- 2) возможность сокращения продолжительности обжига;
- 3) уменьшение боя капселей;
- 4) чистота помещений и атмосферы (отсутствие копоти).

С целью внедрения газового отопления в печах большого объема и при использовании менее калорийных газов требуется проведение дополнительных опытов для достижения достаточной быстроты и равномерности обжига в разных пунктах печной камеры. Необходимо также проработка конструкций топок и методов газового обжига, гарантирующих устойчивую работу без опасности взрывов газа в печной камере.

## VI. Краткий проверочный расчет реконструкции круглого двухэтажного горна<sup>1</sup>

Топливо — дрова с влажностью  $W^P = 40\%$ .

1) Элементарный состав дров в %:

$$\begin{aligned}
 C &= 29,2 \\
 H &= 3,6 \\
 O &= 25,2 \\
 N &= 0,8 \\
 A &= 1,2 \\
 W &= 40,0
 \end{aligned}$$

100%

<sup>1</sup> Проект реконструкции горна и расчет сделаны инж. П. И. Солдатовым и инж. Б. Г. Пиотровским.

2) Теплотворная способность топлива:

$$Q_H^p = 81 C + 300 H - 26 (O - S) - 6 (9 H + W) = \\ = 81 \cdot 29,2 + 300 \cdot 3,6 - 26 \cdot 25,2 - 6 (9 \cdot 3,6 + 40) = 2367 \text{ кал/кг.}$$

3) Теоретический объем воздуха:

$$V_0 = 0,089 C + 0,267 H + 0,033 (S - O) = 2,74 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

4) Объем топочных газов (для нормальных условий:  $0^\circ \text{C}$  и  $760 \text{ мм рт. ст.}$  давление), при сгорании, с содержанием  $\text{CO}_{2\text{max}} = 20,2\%$  и содержанием  $\text{CO} = 0$ , определяется по формулам:

Сухих газов:

$$V_{\text{с. г.}} = \frac{1,86 \cdot C}{\text{CO}_2 + \text{CO}} = \frac{1,86 \cdot C}{\text{CO}_2} = \frac{1,86 \cdot 29,2}{20,2} = 2,69 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Водяного пара:

$$V_{\text{в. п.}} = \frac{9 H + W}{80,5} = 0,9 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Общий объем =  $3,59 \text{ нм}^3/\text{кг.}$

В дальнейшем объем дымовых газов в зависимости от избытка воздуха определяем по формуле:

$$V = 2,69 \alpha + 0,9 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

5) Теоретическая температура горения:

$$T_{\text{г}} = \frac{Q_H^p + \alpha V_0 C_{\text{в}} t_{\text{в}}}{V C}$$

Предполагаем, что горение в камере происходит с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,2$ ;  $t_{\text{в}} = 100^\circ \text{C}$  (с применением горячего дутья):

$$V = 2,69 \cdot 1,2 + 0,9 = 4,16 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Теплоемкость дымовых газов, принимая предварительно температуру горения равной  $1700^\circ \text{C}$ , определим по таблице (инж. Толкованов „Дрова и их сжигание“, стр. 55)  $C = 0,36$ , а теплоемкость воздуха при  $100^\circ \text{C} - C_{\text{в}} = 0,3$ .

$$T_{\text{гор}} = \frac{2367 + 1,2 \cdot 2,74 \cdot 0,3 \cdot 100}{4,16 \cdot 0,36} \approx 1560^\circ \text{C.}$$

Принимая пирометрический коэффициент горения =  $0,85$ :

$$T_{\text{действ.}} = 1560 \cdot 0,85 \approx 1350^\circ \text{C.}$$

#### Размеры топки

Расход топлива принимаем на основании практических данных по эксплуатации горнов аналогичной кубатуры.

Расход топлива на 1 обжиг  $B = 170-180 \text{ м}^3$  дров.

Продолжительность обжига на влажных дровах до реконструкции горна 40—45 часов.

$$\text{Средне-часовой расход топлива } B_{\text{ср}} = \frac{175}{42,5} = 4,1 \text{ м}^3 = 1920 \text{ кг.}$$

Принимая отношение  $\frac{B_{\text{max}}}{B_{\text{сред}}} = 1,35$  и предусматривая уменьшение времени обжига на 10 часов (экономия топлива в размере  $15\%$ ), получим максимальный часовой расход топлива на 1 топку в 1 час при 8 топках.

$$B_{\max} = \frac{1920 \cdot 1,35 \cdot 0,85}{8} \cdot \frac{42,5}{32,5} = 360 \text{ кг на 1 топку в час.}$$

Напряжение колосниковой решетки принимаем в  $B/F = 360 \text{ кг/м}^2/\text{час}$ .  
Площадь решетки:

$$F = \frac{360}{360} = 1 \text{ м}^2.$$

Запроектированы топки с размерами решетки:  $0,75 \times 1,3 = 1 \text{ м}^2$ .  
Слой в конце обжига можно держать высотой  $\sim 0,75 \text{ м}$ .

### Гидравлическая проверка основных конструктивных размеров

1) Коэффициент избытка воздуха принимаем при максимальном часовом расходе топлива:

- |                                  |                  |
|----------------------------------|------------------|
| а) в топке                       | $\alpha_1 = 1$   |
| б) в камере I этажа              | $\alpha_2 = 1,2$ |
| в) в подду и вертикальном канале | $\alpha_2 = 1,2$ |
| г) в камере II этажа             | $\alpha_3 = 1,3$ |
| д) в трубе                       | $\alpha_3 = 1,3$ |

2) В соответствии с этим, объем дымовых газов будет:

$$V_{\alpha_1} = 3,59 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{\alpha_2} = 4,16 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{\alpha_3} = 4,40 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

3) Секундный объем дымовых газов в  $\text{нм}^3$ :

$$V_{\text{сек}} = \frac{360 \cdot 3,59 \cdot 8}{3600} = 2,87 \text{ нм}^3/\text{сек},$$

$$\alpha = 1;$$

$$V_{\text{сек}} = \frac{360 \cdot 4,16 \cdot 8}{3600} = 3,33 \text{ нм}^3/\text{сек},$$

$$\alpha = 1,2;$$

$$V_{\text{сек}} = \frac{360 \cdot 4,4 \cdot 8}{3600} = 3,52 \text{ нм}^3/\text{сек},$$

$$\alpha = 1,3.$$

Температуру и удельный вес дымовых газов принимаем:

	Температура в °C	Удельный вес
а) в топке . . . . .	1200	0,25
б) в камере I этажа . . . . .	1350	0,22
в) под подом и в вертикальных каналах . . . . .	1200	0,25
г) в камере II этажа . . . . .	1000	0,28
д) в трубе . . . . .	900	0,37

Коэффициент избытка воздуха и температура газов в различных частях горна взяты для конечной стадии обжига при максимальном часовом расходе топлива и наибольшем объеме газов.

В таблице 52 приведены гидравлические сопротивления горна, из которых видно, что полное гидростатическое сопротивление горна — 22,80 мм вод. ст.

Располагаемый гидростатический напор:

$$h_{\text{расп}} = H(\gamma_{\text{возд}} - \gamma_{\text{газа}}),$$

где  $H$  — высота устья трубы от уровня колосниковой решетки в м,

$\gamma_{\text{возд}}$  — вес 1  $\text{м}^3$  воздуха,

$\gamma_{\text{газа}}$  — вес 1  $\text{м}^3$  печных газов (при принятой средней их температуре в разных точках печи = 1000° C).

$$h_{\text{расп}} = 22,27 (1,293 - 0,283) = 24,5 \text{ мм вод. ст.}$$

Сопоставление гидростатического напора горна с его гидравлическим сопротивлением при обжиге на влажных дровах показывает, что горн будет работать с небольшим запасом тяговых ресурсов.

## ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КРУГЛОГО ДВУХЭТАЖНОГО ГОРНА

№ участка	Название	$V$ объем нм <sup>3</sup> /сек	$T_{cp}$ темпе- ратура средняя °С	$(1 + \alpha T)$	$V_1$ м <sup>3</sup> /сек	$F$ сечение м <sup>2</sup>	$W$ скорость м/сек	$d$ приведен- ный диа- метр мм	$R'$ сопро- тив. трения на 1 пог. м	$\gamma$ удельный вес кг/м <sup>3</sup>	$\left(\frac{1,2}{\gamma}\right)^{0,852}$	$R$ действит. коэф- фициент сопро- тивл. трения	$l$ длина м	$Rl$ нм вод. ст.	$\Sigma \xi$ коэффи- циент мест- ного сопро- тивления	$\frac{W^2 \gamma}{2g}$	$\frac{\epsilon W^2 \gamma}{\Sigma 2g}$	$Z$ общее со- противлен. нм вод. ст.	
1	Подовые отверстия	3,33	1350	5,9	19,6	1,3	15,1	130	2,30	0,23	0,238	0,55	0,55	0,30	0,5 + 1 = 1,5	2,64	3,96	4,26	
2	Подподовые каналы	3,33	1200	5,4	18,0	1,5	12,0	600	0,25	0,25	0,27	0,07	4,0	0,28	0,1 + 1 = = 1,10	1,8	1,95	2,23	
3	Вертикальн. каналы	3,33	1200	5,0	16,6	1,5	11,1	600	0,21	0,25	0,27	0,07	6,0	0,42	0,30	1,34	0,4	0,82	
4	Под II этажа . . . . .	3,33	1000	4,8	16,0	1,45	11,1	260	0,55	0,278	0,30	0,09	0,25	0,02	0,3 + 1 = 1,3	1,75	2,27	2,29	
5	Труба . . . . .	3,52	900	4,3	15,1	0,636	23,8	900	0,48	0,315	0,32	0,15	8,5	1,30	0,2 + 1 = 1,2	9,1	10,9	12,2	
6	Разрежение на полу	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,0	
	Итого . . . . .																		22,80

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

### ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ПЕЧЕЙ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

#### I. Потери, обусловленные недостатками рабочего цикла

В печах периодического действия большая часть тепла поглощается кладкой и уходит с отработавшими печными газами. Величина потерь тепла, уносимого отработавшими газами, зависит, в основном, от их температуры и удельного секундного расхода на 1 *m* печной загрузки. Эти факторы, в свою очередь, определяются заданным температурным режимом обжига, длиной пути, проходимого газами в контакте, с нагреваемыми поверхностями, условиями теплопередачи, избытком или недостатком подаваемого в топку воздуха. Как правило, температура обжигаемых керамических изделий колеблется в пределах 1200—1500°С, что уже определяет высокие температуры отработавших газов в средней и конечной стадии обжига. Повышение температуры в конечной стадии обжига, обычно, замедляется, что приводит к прогрессирующему росту потерь с отходящими газами, параллельно с ростом конечной температуры обжига продукции.

Требования, предъявляемые к обжигу в начальной и конечной его стадиях, резко противоположны. В период „прокурки“ требуется постепенный нагрев с усиленным газообменом внутри камеры, что достигается путем ведения процесса горения с большим избытком воздуха. Хотя в конце обжига топки работают с расходом воздуха, приближающимся к нормальному, и в некоторых случаях даже с химической неполнотой горения, однако, в некоторых производствах (например, фаянсовом) в крупных камерах приходится выравнивать температуру с помощью прогаров в топках, т. е. ведя процесс с большими избытками воздуха, что также увеличивает потери с отходящими газами. При обжиге фарфора отходящие газы отдают часть тепла сырому фарфору, обжигаемому во втором этаже (утильной камере). Благодаря этому, соответственно снижаются тепловые потери. Весьма большая затрата тепла идет в процессе обжига на нагрев печной кладки, каждый раз охлаждаемой до температуры, позволяющей производить загрузку и разгрузку камеры в более или менее нормальных условиях.

Поглощение (аккумуляция) тепла печной кладкой представляет собой довольно сложное явление, так как нагревание и охлаждение печной кладки протекает с отставанием от изменения температуры

в печной камере и обусловлено как температурным режимом, так и толщиной стены и ее теплопроводностью. Помимо более или менее регулярной теплопередачи внутри стены к наружной ее поверхности, имеет место знакопеременный поток тепла между средними слоями печной кладки и ее поверхностью, выходящей внутрь камеры. Нагрев же стен и сводов камеры после длительного их охлаждения (равновесное состояние) обусловлен более простой зависимостью между температурами внутренней и наружной поверхностей стен и теплопроводностью их кладки.

Графически температура стен в разных точках в конце обжига может быть охарактеризована кривой, построенной на данных основного закона Фурье. При охлаждении камеры устанавливается обратный тепловой поток к внутренней поверхности стен, с которых тепло снимается в процессе охлаждения камеры.

Количество аккумулируемой теплоты определяется толщиной так называемого „активного слоя“ стены или свода, в котором протекает знакопеременный процесс поглощения и передачи тепла; остальные (наружные) слои стены обуславливают величину теплоотдачи в окружающую среду.

Потери на нагрев кладки растут в зависимости от увеличения продолжительности обжига и теплопроводности стен. Поглощение кладкой тепла и отдача его в камеру в процессе охлаждения, помимо потерь тепла, затрудняют выборку обожженных изделий из камеры и, таким образом, снижают производительность печей и повышают стоимость обслуживания.

Потери от химической неполноты горения (наличие в отработавших газах  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и др.), как правило, происходят вследствие переменного режима топок, работающих в начальный и конечный период в условиях, не благоприятствующих завершению процесса горения. В некоторых производствах, как например в фарфоровом, технологический процесс образования черепка фарфора требует в определенный период обжига восстановительной атмосферы. Все же и в этом случае потери от химического недожога топлива бывают значительно выше, чем это необходимо для получения высококачественной продукции, и в значительной мере обуславливаются чрезмерным напряжением работы топок в конечный период обжига.

Потери тепла от провала угля и кокса через решетку зависят от качества топлива и обслуживания топок. При сжигании дров с преобладанием твердых пород в круглых фарфоровых горнах на решетках скопляется много древесного угля, от которого приходится их периодически очищать, что приводит к увеличению провала через решетку.

Переходя к тепловому балансу печей периодического действия, необходимо условиться относительно понятия о полезном расходе тепла. В отношении печей для обжига грубой керамики вопрос обстоит значительно проще, чем в отношении печей для тонкой керамики, где изделия загружаются в камеру со вспомогательным огнеупорным припасом, превышающим по весу их загрузку основной продукцией.

Полезным расходом тепла для печей грубой керамики считается количество калорий, затраченное на удаление механически и химически связанной в изделиях воды, на химические реакции, протекающие в процессе обжига, а также на нагрев изделий до конечной температуры обжига. Однако, несмотря на кажущуюся несложность определения полезной затраты тепла, здесь приходится сталкиваться

СРЕДНЯЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАГРЕВЕ В ИНТЕРВАЛЕ ОТ 0 ДО  $t$  в °С УЧЕТОМ ЗАТРАТЫ ТЕПЛА НА ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ (ПО КОНУ)

Темпера- тура в °С	Летяцки каолин	Фарфоро- вая глина	Искус- ственный корунд	Ползвой шпат	Сили- манит	Розовый кварц	Норвеж- ский кварц	Холмберг- ский песок	Кристо- балит	Халцедон	Необож- женный женный фарфор	Обожжен- ный фар- фор	Необож- женный ка- менный товар	Обожжен- ный камен- ный товар	Глина из Гале	Необож- женный шмот	Обожжен- ный шмот	Необож- женная фарфоровая гладурь	Обожжен- ная фарфоровая гладурь
100	0,201	0,200	0,203	0,161	0,160	0,190	0,190	0,190	0,194	0,167	0,185	0,189	0,181	0,186	0,189	0,197	0,170	0,179	
200	0,203	0,202	0,211	0,162	0,161	0,205	0,206	0,205	0,212	0,172	0,187	0,195	0,183	0,192	0,195	0,202	0,174	0,181	
300	0,213	0,213	0,223	0,168	0,163	0,215	0,217	0,214	0,237	0,175	0,197	0,203	0,192	0,203	0,211	0,213	0,182	0,189	
400	0,226	0,226	0,231	0,179	0,167	0,226	0,226	0,223	0,238	0,177	0,213	0,212	0,201	0,212	0,223	0,220	0,193	0,197	
500	0,249	0,248	0,242	0,191	0,170	0,239	0,239	0,233	0,244	0,185	0,228	0,222	0,215	0,223	0,248	0,231	0,208	0,199	
600	0,415	0,415	0,231	0,202	0,173	0,256	0,256	0,251	0,248	0,189	0,332	0,232	0,252	0,234	0,348	0,238	0,247	0,202	
700	0,430	0,438	0,239	0,211	0,174	0,257	0,257	0,254	0,252	0,193	0,324	0,245	0,289	0,275	0,344	0,244	0,238	0,204	
800	0,426	0,424	0,272	0,222	0,175	0,259	0,260	0,257	0,257	0,198	0,264	0,279	0,286	0,286	0,331	0,251	0,259	0,211	
900	0,438	0,439	0,287	0,229	0,172	0,262	0,263	0,262	0,261	0,203	0,324	0,287	0,281	0,296	0,323	0,260	0,278	0,218	
1000	0,428	0,429	0,304	0,246	0,175	0,267	0,267	0,267	0,226	0,210	0,331	0,304	0,289	0,307	0,344	0,277	0,280	0,230	
1100	0,422	0,429	—	0,260	0,195	—	—	—	—	0,218	0,354	0,337	0,331	0,324	0,358	0,288	0,290	0,245	
1200	0,415	0,416	—	0,262	0,199	—	—	—	—	—	0,363	—	0,328	—	0,369	—	0,299	—	
1300	0,406	0,407	—	—	0,205	—	—	—	—	—	0,373	—	0,340	—	0,402	—	0,307	—	
1400	0,410	0,412	—	—	0,202	—	—	—	—	—	0,383	—	—	—	0,415	—	0,292	—	



с рядом чисто методологических трудностей, обусловленных еще недостаточным изучением процессов обжига.

В виде примера можно указать на тепло, необходимое для удаления из изделий химически связанной в глинистых материалах воды, которое происходит при разных температурах с переменной интенсивностью, в зависимости от скорости обжига, в соответствии с чем меняется и необходимая для дегидратации затрата тепла.

Помимо реакций, протекающих с затратой тепла — эндотермических, в глинистых веществах керамической массы происходит реакция экзотермическая (с выделением тепла). В заграничной литературе расход тепла на химические реакции и нагрев обжигаемого керамического черепка до заданной температуры суммируется и обозначается общим термином „Specific heat“, который иногда неправильно заменяется русскими словами „удельная теплоемкость“. В действительности, этот термин охватывает более широкое понятие, точнее выражаемое термином „теплоемкость при нагреве“. В таблице 53 приводятся данные (по Кону) о теплоемкости при нагреве некоторых сырых материалов и массы в разных интервалах температуры.

В настоящее время еще нет стандартной методики составления тепловых балансов и потому их сопоставление без указания отправных данных и принятых коэффициентов может привести к неверным заключениям о работе печей. По данным Мак-Ги,<sup>1</sup> приводящего в своей статье (помещенной в журнале Американского керамического о-ва) данные о расходе тепла на нагревание керамических материалов и масс, коэффициенты полезного действия печей, исчисляемые в 22% от общего расхода тепла, в некоторых случаях, при уточнении расхода тепла на нагрев продукции, повышались до 35%. В производствах тонкой керамики в печную камеру вместе с изделиями загружаются огнеупорные капсулы, плиты и т. п. вспомогательные материалы, имеющие целью предохранять изделия от деформации и от непосредственного воздействия пламени. При определении полезного расхода тепла вспомогательная загрузка камеры (капсулы) иногда не принимается во внимание, и, как полезно используемое, учитывается лишь тепло, затраченное на нагрев изделий. Получаемый при подобном расчете так называемый „экономический коэффициент полезного действия“ является нехарактерным показателем, так как с точки зрения оценки конструкции печи и ее эксплуатации является несущественным — нагреваются ли капсулы и другие огнеупорные припасы как основная продукция или как вспомогательные материалы.

Общее выражение экономического коэффициента полезного действия

$$\eta = \frac{A}{B},$$

где:

*A* — расход тепла на нагрев продукции до конечной температуры обжига,

*B* — общий расход тепла в печи.

Сопоставление „экономических“ к. п. д. печей в разных отраслях керамической промышленности, в которых вспомогательная загрузка может колебаться от 0 до 500% от веса обжигаемых изделий, не дает никаких результатов, и тепловые балансы в этом смысле теряют всякую ценность.

---

<sup>1</sup> См. русский перевод статей: Мак-Ги и Симпсона. Теплоемкость керамических материалов и масс при обжиге, под ред. П. И. Юдинсона. М., ТТИ, 1930.

Поэтому „технический коэффициент полезного действия“, характеризующий полезный расход тепла на всю загрузку камеры и определение расхода тепла на 1 м<sup>3</sup> печной камеры (или кубатуры вагонеток в туннельных печах), является единственным сравнимым показателем работы печей и возможно точное установление этих показателей заслуживает надлежащего внимания.

Технический коэффициент полезного действия

$$\eta_t = \frac{A + K}{B},$$

где:

*A* — расход тепла на нагрев продукции,

*K* — расход тепла на нагрев огнеупорных вспомогательных материалов,

*B* — полный расход тепла на обжиг (со включением потерь).

В условиях эксплуатации одна и та же печь может работать с разными коэффициентами полезного действия, в зависимости от работы обслуживающего персонала и качества топлива. Процесс обжига становится весьма неэкономичным, когда низкий пирометрический эффект горения, получаемый при сжигании низкокалорийного топлива, обуславливает большую длительность обжига из-за невозможности нагревать продукцию до заданной температуры в установленный промежуток времени.

Поэтому изучение теплового баланса керамической печи, без учета качества топлива и продолжительности обжига, не может дать верных выводов о работе печи и методах рационализации обжига.

Более или менее объективные сравнительные характеристики работы печей можно получить лишь при их работе на топливе, сходном по основным качествам (калорийность, удобство сжигания), так как попытки приведения тепловых балансов печей расчетным путем к единообразным условиям их работы, обычно, не дают надежных результатов. Составление теплового баланса всей установки и отдельных ее элементов позволяет наметить план сокращения тепловых потерь и пути реорганизации теплового хозяйства заводов.

В таблице 50 приведены технические коэффициенты полезного действия типичных печей периодического действия в период их обследования. При их рассмотрении необходимо учитывать следующие факторы, отражающиеся на коэффициенте полезного действия печей и размерах тепловых потерь:

1) конструкцию печи;

2) род обжигаемых изделий, в зависимости от которого находится оптимальная кривая, продолжительность и конечная температура обжига;

3) качество топлива, метод обслуживания печи и регулирования ее работы, обуславливающие выполнение режима обжига.

В тепловых балансах часто отсутствует ряд данных, необходимых для учета влияния вышеперечисленных факторов, обуславливающих величину потерь, поэтому в подобных случаях возможно лишь ориентировочное сравнение работы различных печей. Необходимость разработки в ближайшее время стандартной методики испытания печей и составления тепловых балансов становится очевидной, если учесть большие затраты средств и времени на исследования работы печей и полученное в результате этих исследований относительно небольшое накопление доброкачественных материалов, пригодных для всестороннего практического использования.

Печи периодического действия имеют большие потери тепла с отходящими газами — около 25% и на аккумуляцию тепла кладкой стены и сводов примерно 30% от общего количества тепла, получаемого в печи при сжигании топлива.

В целях сокращения тепловых потерь применяются разные устройства для использования тепловых „отходов“ на производственные и другие нужды.

Сокращение потерь тепла, аккумулированного печной кладкой и обожженными изделиями, производится более простыми средствами, чем утилизация тепла отходящих дымовых газов, и потому установки для использования тепла, отдаваемого печью при охлаждении, встречаются почти на всех керамических заводах.

## II. Использование тепла охлаждаемой печи

Горны периодического действия охлаждаются пропусканием больших масс воздуха через печную камеру. При этом тепло, затраченное на нагрев фарфора или фаянса, капселей и кладки самого горна в количестве 35—50% от общего количества тепла, расходуемого при обжиге, может быть воспринято воздухом с последующим использованием для отопительных и вентиляционных целей.

Для ускорения остывания печей пользуются специальными вытяжными трубами с естественной тягой и с принудительной отсасывающей или нагнетательной вентиляцией.

Рассмотрим достоинства и недостатки этих способов охлаждения горнов.

Охлаждение с помощью естественной тяги горячего воздуха через дымовую трубу является самым несовершенным, так как естественный гидростатический напор не обеспечивает быстрого охлаждения печей и не дает возможности использовать получаемый горячий воздух на отопление заводских помещений.

При устройстве специальных вытяжных труб, в дополнение к дымовой трубе, значительно ускоряется остывание горнов. Так, на Кировском заводе после устройства в горнах для обжига политух изделий (одноэтажных с обратным пламенем) отдельных вытяжных труб, время на остывание сократилось в среднем с 72—89 часов до 20—25 часов без увеличения боя, что объясняется правильным направлением охлаждающего воздуха и равномерным распределением его между капселями. Если в отношении быстроты охлаждения путем устройства дополнительных труб можно достичь хороших результатов и с естественной тягой, то недостаточность последней сразу дает себя чувствовать при использовании теплового воздуха, когда приходится распределять его по отдельным помещениям. Горны № 14 и 15 Кировского завода, в которых производится утильный обжиг фаянса, имеют, как видно из рис. 88, высокие вытяжные трубы по две на каждый горн. Общая высота от уровня пода до выходного отверстия трубы 27,4 м, диаметр 560 мм.

На уровнях потолков II, III и IV этажей здания, занятого формовочным цехом, трубы имеют дроссельные клапаны и боковые дверки, с помощью которых горячий воздух распределяется по сушилкам трех этажей.

При открытии труб на вылет, горн остывает в течение 30—40 часов; когда же теплый воздух, по условиям производства, распределяется с помощью дроссельных клапанов и заслонок по

сушилкам II, III и IV этажей, то остывание горнов затягивается до 50—60 часов.

Совершенно очевидно, что при менее высоких трубах или при более сложной распределительной коммуникации горячего воздуха естественной тяги последнего будет недостаточно, и потому использование горячего воздуха на сушку фаянса приведет к задержке оборачиваемости печей и снижению их производительности. Особенно ярко это противопоставление скорости охлаждения печей и возможности максимального использования горячего воздуха выступает при отсутствии искусственной вентиляции в зимние месяцы, когда обогрев сушильных помещений происходит весьма нерегулярно, в зависимости от интервалов между периодами охлаждения отдельных печей.

Необходимость повышения оборачиваемости печей в первую очередь потребовало введения принудительной вентиляции горнов для увеличения воздухообмена и ускорения охлаждения.

На большинстве керамических заводов СССР, оборудованных печами периодического действия, устройство принудительной вентиляции производилось в действующих уже установках по разнообразным схемам. Между тем, охлаждение изделий и кладки печей тесно связано с последующим использованием воздуха для процесса сушки и для отопления производственных и вспомогательных помещений, и потому проектирование технически совершенного искусственного охлаждения печей неразрывно связано с проектированием всей системы предварительной подготовки горячего воздуха и его распределения по цехам-потребителям. Одним из примеров довольно удачного разрешения вопроса охлаждения печей с частичным использованием горячего воздуха является устройство приточно-вытяжной системы на фарфоровом заводе „Пролетарий“ Новгородского р. в точильно-горновом отделе для двухэтажных горнов с обратным пламенем.<sup>1</sup>

С помощью этой системы отепляется и вентилируется путем подачи теплого воздуха по разветвленным трубопроводам трехэтажный корпус длиной в 131 м и шириной в 22,5 м, имеющий небольшую пристройку, в котором размещены формовочный, капсельный и горновой цехи фабрики.

Ввиду значительной длины зданий и во избежание устройства столь же длинных магистралей для разводки теплового воздуха, в которых создаются большие сопротивления, система подразделяется на две установки, самостоятельно обслуживающие по половине корпуса с тремя смежными горнами. Горны №№ 1, 2 и 3 составляют первую группу, горны №№ 4, 5 и 6 — вторую (рис. 106).

В процессе оборудования обе группы, отсасывающие горячий воздух из горнов, были соединены резервным трубопроводом, который дает возможность использовать горячий воздух горнов первой группы 2-й вентиляционной установкой для отопления противоположной части корпуса, и наоборот. Устройство соединительного трубопровода позволяет более равномерно отеплять весь корпус даже при наличии остывающих горнов только в одной половине корпуса.

Вентиляционная система состоит из:

1) вытяжных труб, установленных по две на каждом горне в дополнение к центральной трубе;

---

<sup>1</sup> Вентиляционная установка оборудована в 1930 г. по проекту инж. Б. Ляхова. В настоящее время установка усиливается путем устройства отдельных отсасывающих трубопроводов из политых камер.

- 2) вытяжных магистралей для воздуха;
- 3) отсасывающих вентиляторов;
- 4) смесительных камер для разбавления горячего воздуха холодным атмосферным;
- 5) нагнетательных вентиляторов;
- 6) распределительных магистралей, подающих теплый воздух в помещение корпуса для сушки изделий и общего отопления цехов.

Как видно из продольного разреза корпуса (рис. 107), отсасывающие трубопроводы (кроме горнов № 1 и № 2), отсасывающие вентиляторы, смесительные камеры и нагнетательные вентиляторы размещены на чердаке корпуса, а вся разводящая система для подачи теплого воздуха размещена под потолками. Поэтому эксплуатация установок не мешает производству, а управление моторами и смесительными камерами и регулирование работы вентиляции осуществляются в благоприятных условиях.

С помощью термометров контролируется температура воздуха, отсасываемого из горнов при охлаждении последних. При повышении температуры за пределы 300—400°С, угрожающем пережогом отсасывающего вентилятора, во всасывающем трубопроводе открываются заслонки для подсоса холодного воздуха и снижения температуры до нормальной. В цеха воздух должен подаваться с температурой, как правило, не превышающей 100—150°С, так как более горячий воздух не успевает достаточно перемешаться с воздухом помещения и, достигая близко расположенных к воздухопроводу изделий, приводит к неравномерной их сушке и растрескиванию. Кроме того, горячий воздух, достигая рабочих мест, может ухудшить условия труда. В целях обеспечения желательной температуры воздуха, подаваемого в цеха, и ее регулирования устроены смесительные камеры.

Как видно из рис. 108 и 109, отсасывающий вентилятор 1 подает горячий воздух в переднюю часть смесительной камеры, из которой последний может с помощью поворотной заслонки направляться по трубе 4 в атмосферу или же через отверстие, регулируемое шибером 2, в смежную часть смесительной камеры.

Количество горячего воздуха, подаваемое в камеру, регулируют заслонкой 3, в зависимости от потребности цехов в теплом воздухе. В летнее время заслонка 3 опускается и большая часть горячего воздуха выбрасывается в атмосферу, а в зимнее, наоборот, почти весь воздух подается при поднятой заслонке 3 в камеру и в дальнейшем через нагнетательную систему в помещения цехов. Горячий воздух, поступающий в камеру через отверстие 2, может разбавляться холодным, поступающим из атмосферы через трубу 5. Подача холодного воздуха регулируется поворотной заслонкой 6. Теплый воздух, полученный путем разбавления атмосферным воздухом горячего воздуха, поступающего из охлаждающихся горнов, подается с помощью нагнетательного вентилятора 7 через разветвленную систему воздухопроводов в цеха для сушки изделий и отопления. При полном открытии заслонки 6 и полном закрытии шибера 2, помещения вентилируются атмосферным воздухом; наоборот, при полном закрытии заслонки 6 и открытии шибера 2, помещения обогреваются исключительно воздухом, поступающим через охлаждаемые горны. Частичным открытием заслонки 3 и шибера 2 взаимно регулируется состав воздушной смеси, подаваемой в цеха. Воздух в охлаждающиеся горны, обычно, поступает из подвального помещения через топки и из помещений отдельных цехов через загрузочные двери. Воздух, проходя-

щий через подвал, можно считать чистым атмосферным воздухом (при условии, если он подается через толчки, очищенные от золы и угля); воздух, поступающий в горны из цехов, загрязнен углекислотой и часто бывает насыщен парами, поэтому вентиляция помещений с использованием воздуха от охлаждающихся горнов неизбежно приводит к частичной рециркуляции воздуха в цехе, т. е. к повторному использованию.

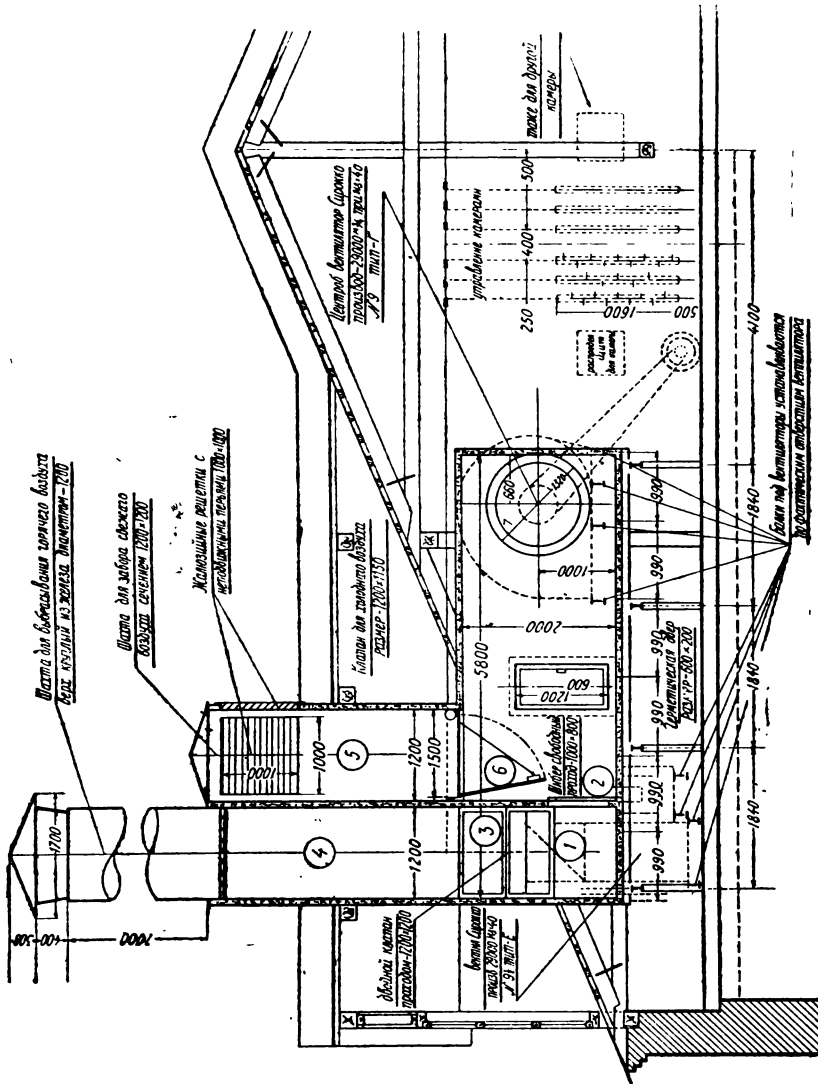


Рис. 108. Смесительная камера вентиляции (продольный разрез).

При достаточной подаче свежего воздуха и правильном разбавлении его рециркулирующим цеховым воздухом, можно удовлетворить как требования производства, так и требования охраны труда, создавая нормальные условия сушки и работы. На большинстве предприятий отсутствуют устройства для регулирования состава воздуха, подаваемого в цеха. В описанной же установке эти возможности имеются. Правильной ее регулировкой можно обеспечить желательные свойства (кондиции) подаваемого воздуха, хотя



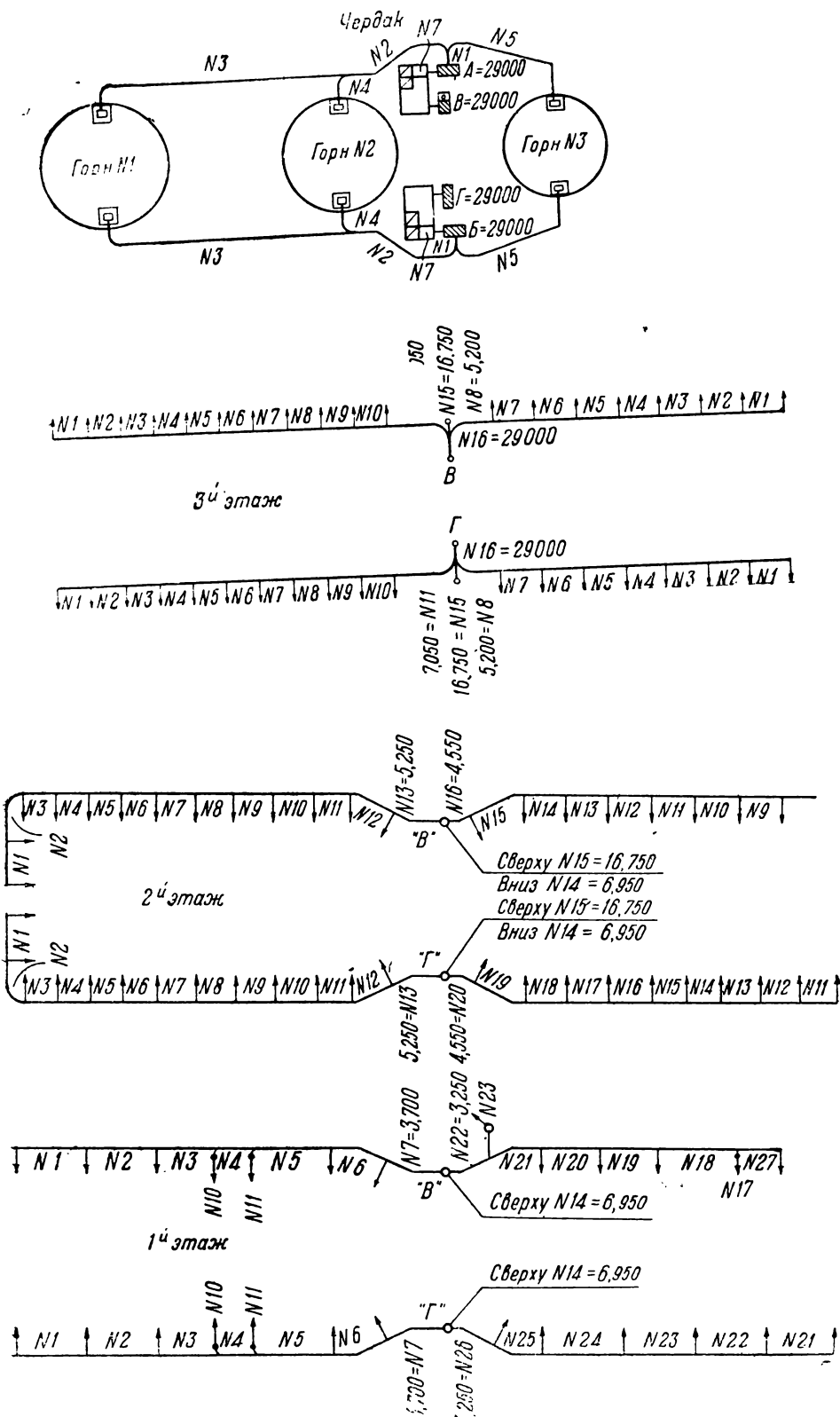


Рис. 110. Схема воздухопроводов вентиляции



### ТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

воздушных труб для проекта искусственного охлаждения горнов и использования  
тепла для отопления, вентиляции и сушки изделий в точильно-горновом корпусе  
фарфорового завода „Пролетарий“  
(результативные данные)

№ уча-стка	Воз-духа м <sup>3</sup>	l м	П р и н я т о						Σ IR + Z в мм вод. ст.	Примечание
			d	R/1 м мм вод. ст.	V м/сек.	IR в мм вод. ст.	ξ <sub>c</sub>	Z в мм вод. ст.		
Отсасывающие из горнов центробежные вентиляторы „А“ и „Б“ производительностью по 29 000 м <sup>3</sup> в час										
Горн № 1. Вентилятор „А“, смесит. камера										
3	4	22	800	0,067	8	1,4	2,6	10,1	25	Добав. разреж. в Горн № 1 = 13,5 мм — — Общее сопротивление = 40 мм вод. ст.
Камера	2	8,1	1000	0,081	10	0,9	1,3	7,9	33,8	
	1	8,1	1000	0,055	9	0,1	—	—	33,9	
	8,1	7	1250	0,012	5	0,1	4	6	40	
Горн № 2 — отросток										
4	4	2	800	0,07	8	0,14	2,5	9,75	25	Добавл. разреж. в горня № 2 = 15,11 мм
Горн № 3. Вентилятор „А“										
5	4	14	800	0,067	8	1	4,2	16,4	33,9	Добавл. разреж. в горня № 3 = 16,5 мм
Нагнетательный вентилятор „В“, производительность в 29 000 м <sup>3</sup> в час										
Смесительная камера — вентилятор „В“										
19	8,1	3	1,4 × 1,2	0,012	4,8	0,04	3	3,9	4,0	—
18	8,1	2	2 × 2	—	2	—	3	1,8	5,8	—
17	8,1	1	1080	—	9	—	0,5	2,5	8,3	—
Центробежный вентилятор „В“ — стояк, I этаж (левая сторона)										
16	8,1	2	1000	0,081	10	0,20	—	—	31,7	С добавл. 1 мм на высоту вентил.
15	4,65	4	850	0,067	8	0,28	1	3,9	30,5	С добавл. 2 мм на высоту узла
14	1,9	4	600	0,067	7	0,27	1	3,0	24,3	С добавл. 2 мм на высоту узла
7	1,0	3	475	0,067	6	0,20	1	2,2	19,0	—
6	0,9	8	450	0,067	6	0,60	1	2,2	16,5	—
5	0,8	6	425	0,081	6	0,50	1	2,2	13,7	—

№ участка	Воздуха м <sup>3</sup>	l м	П р и н я т о						Σ IR+Z в мм вод. ст.	Примечание
			d	R/1 м мм вод. ст.	V м/сек.	IR в мм вод. ст.	ξ <sub>c</sub>	Z в мм вод. ст.		
4	0,55	4	350	0,10	6	0,40	1	2,2	11,0	—
3	0,3	7	260	0,14	6	1,0	1	2,2	8,4	—
2	0,2	7	220	0,17	5	1,20	1	1,5	5,2	—
1	0,1	4	180	0,12	4	0,48	2	2,0	2,5	—
Общее сопротивление = 8,3 + 31,7 = 40 мм вод. ст.										
Отростки в 1 этаже (левая сторона)										
10	0,25	3	240	0,17	6	0,51	2,8	6,16	6,67	В узле № 3 давл. = 8,4 мм В узле № 4 давл. = 11 мм
11	0,25	3	220	0,25	7	0,75	2,8	8,40	9,15	
Центробежный вентилятор „В“, II этаж (левая сторона)										
1	0,11	3	220	0,081	3,5	0,24	2	1,6	1,84	—
2	0,22	7	280	0,055	4,0	0,40	1	1,0	3,24	—
3	0,33	4	325	0,067	4,0	0,30	1	1,0	4,54	—
4	0,44	3	350	0,067	4,5	0,21	1	1,2	5,95	—
5	0,55	4	375	0,081	5,0	0,32	1	1,5	7,77	—
6	0,66	4	400	0,067	5	0,27	1	1,5	9,54	—
7	0,77	4	425	0,055	5	0,20	1	1,5	11,24	—
8	0,88	3	450	0,067	5	0,21	1	1,5	12,95	—
9	0,99	3	500	0,055	5	0,18	1	1,5	14,63	—
10	1,11	3	500	0,067	6	0,29	1	2,2	16,12	—
11	1,22	3	500	0,055	6	0,18	1	2,2	18,50	—
12	1,33	4	550	0,055	6	0,20	1	2,2	20,90	—
13	1,45	4,5	550	0,067	6,5	0,25	1	3,0	24,30	Равно давл. в узле № 14
Центробежный вентилятор „В“, III этаж (левая сторона)										
1	0,18	3	300	0,025	2,5	0,07	2,2	1,0	1,07	—
2	0,36	3	325	0,067	4,5	0,20	1	1,2	2,47	—
3	0,54	4	375	0,067	5,5	0,28	1	1,5	4,25	—
4	0,72	4	400	0,081	6,0	0,32	1	2,2	6,77	—
5	0,90	3	425	0,10	6,0	0,30	1	2,2	9,27	—
6	1,08	3	475	0,10	6,5	0,30	1	2,6	12,17	—
7	1,26	4	500	0,081	6,5	0,32	1	2,6	15,09	—
8	1,44	3	500	0,10	7,0	0,30	1	3,0	18,39	—
9	1,62	3	525	0,085	7,5	0,24	1	3,15	21,78	—
10	1,80	4	550	0,10	8,0	0,40	1	3,9	26,08	—
11	2,0	4,5	550	0,121	8,0	0,52	1	3,9	30,50	Равно сопротивл. в узле № 15
Центробежный вентилятор „В“, I этаж (правая сторона)										
17	0,25	3	260	0,10	4,5	0,3	2,3	2,8	3,1	—
18	0,36	7	280	0,14	6	1,0	1	2,2	6,3	—

№ участка	Воздуха м <sup>3</sup>	l м	П р и н я т о						Σ IR+Z в мм вод. ст.	Примечание
			d	R/1 м мм вод. ст.	V м/сек.	IR в мм вод. ст.	ε <sub>c</sub>	Z в мм вод. ст.		
19	0,46	7	325	0,10	6	0,7	1	2,2	9,2	—
20	0,56	3	350	0,10	6	0,3	1	2,2	11,7	—
21	0,66	4	350	0,14	7	0,6	1	3,0	15,3	—
22	0,90	3	400	0,10	7	0,4	1	3,3	19,0	Равно сопротивл. в узле № 7
Отростки в I этаже (правая сторона)										
23	0,25	3	200	0,37	8	1,11	2,8	10,92	12,03	В узле № 21 давл. 15,3 мм В узле № 17 давл. = 3,1 мм
17	0,25	3	280	0,055	3,5	0,17	2,8	2,24	2,41	
Центробежный вентилятор „В“, II этаж (правая сторона)										
9	0,16	4	240	0,07	3,5	0,28	2,3	1,8	2,08	—
10	0,32	3	280	0,12	5	0,36	1	1,5	3,94	—
11	0,48	3	325	0,12	6	0,36	1	2,2	6,50	—
12	0,64	3	350	0,14	6,5	0,42	1	2,6	9,50	—
13	0,80	4	375	0,14	7	0,56	1	3,0	13,06	—
14	0,96	3,5	425	0,12	7	0,40	1	3,0	16,46	—
15	1,12	5	450	0,10	7	0,50	1	3,0	19,90	—
16	1,27	3	450	0,14	8	0,40	1	3,94	24,30	Равно давл. в узле № 14
Центробежный вентилятор „В“, III этаж (правая сторона)										
1	0,18	4	240	0,081	4	0,32	2,3	2,3	2,62	—
2	0,36	3,5	300	0,10	5	0,35	1	1,5	4,47	—
3	0,54	3	350	0,10	6	0,30	1	2,2	6,97	—
4	0,72	3,5	375	0,12	7	0,42	1	3,0	10,39	—
5	0,90	3,5	385	0,16	8	0,54	1	3,9	14,83	—
6	1,08	3,5	400	0,16	8	0,54	1	3,9	19,27	—
7	1,26	4	425	0,16	8,5	0,54	1	4,5	24,31	—
8	1,44	4	460	0,17	9,2	0,69	1	5,5	30,5	Равно сопротивл. в узле № 15

Использование тепла, аккумулированного обожженными изделиями и кладкой горна, путем отсоса из печных камер горячего воздуха и подачи вентиляторами в производственные помещения, имеет ряд существенных недостатков. Температура воздуха в печах вначале охлаждения колеблется, в зависимости от характера обжига, около 1000°С, поэтому отсасывание с помощью вентиляторов возможно лишь при его разбавлении большими количествами атмосферного воздуха до температуры 300—400°С. При этом на каждый килограмм воздуха, выходящего из печной камеры, необходимо добавлять

из атмосферы от 2 до 3 кг холодного воздуха, т. е. отсасывать весьма большие объемы воздушной смеси.

Для удаления таких количеств воздуха потребуются вентиляторы весьма крупных размеров с производительностью порядка 50 000 м<sup>3</sup> в час и выше, трубопроводы с диаметрами порядка 1 м и выше, а также большой расход энергии. Высокая первоначальная стоимость оборудования и недостаток энергии вынуждают ряд заводов отказаться от использования тепла при высоких температурах воздуха и проводить остывание горнов до температуры 400—600° за счет естественной тяги через специально устанавливаемые дополнительные вертикальные трубы.

Только после понижения температуры в камерах включается искусственная вентиляция для использования горячего воздуха в производстве.

По этому способу можно достаточно быстро охлаждать печные камеры, однако, большое количество тепла уходит в атмосферу без использования в производстве и потому в настоящее время в промышленности получают значительное распространение нижеописанные более совершенные методы использования тепла горячего воздуха отработавших газов.

### III. Установка системы Бамаг-Мегуин

Приемы использования тепла при высоких температурах воздуха имеют много общего с утилизацией тепла отработавших дымовых газов и приводят в некоторых установках к устройствам, разрешающим задачу использования тех и других тепловых отходов в одном агрегате.

Типичным устройством для комплексного использования тепла дымовых газов и горячего воздуха является установка фирмы Бамаг-Мегуин.

Основной частью установки является котел специальной конструкции, присоединяемый к вытяжным трубам фарфоровых горнов. Как видно из разреза и плана установки (рис. 111), котельная располагается за пределами производственного корпуса на уровне первого этажа в отдельной пристройке.

Большое расстояние между круглыми горнами, достигающее на многих заводах 100 м и больше, требует тщательно продуманной конструкции трубопровода для подачи печных газов в котел, во избежание больших тепловых потерь в пути и снижения температуры утилизируемых газов ниже предела, при котором установка перестает быть рентабельной в эксплуатации. В зависимости от длины газопроводов и эксплуатационных условий, для получения силовой и электрической энергии установка может быть экономически выгодной при температурах дыма и воздуха не ниже 400—500° С. В целях устранения потерь необходима тщательная изоляция трубопроводов.

Висячий трубопровод, прокладываемый на чердаке или в производственных помещениях, выполняется воздухо непроницаемым из листового железа с внутренней обкладкой фасонным изоляционным кирпичом и засыпкой кизельгуром (треппелом) (рис. 112).

Подземные дымоходы также выполняются тщательной изоляцией треппелом и воздушными прослойками (рис. 113). При длинном металлическом трубопроводе подвесной конструкции, в целях поглощения возникающих при колебаниях температуры удлинений и сокра-

щений, устраиваются компенсаторы с сальниковыми уплотнениями, а сам трубопровод монтируется на качающихся стойках или маятниковых подвесках.

В описываемой установке для утилизации тепла отработавших печных газов фарфоровых горнов и горячего воздуха, получаемого

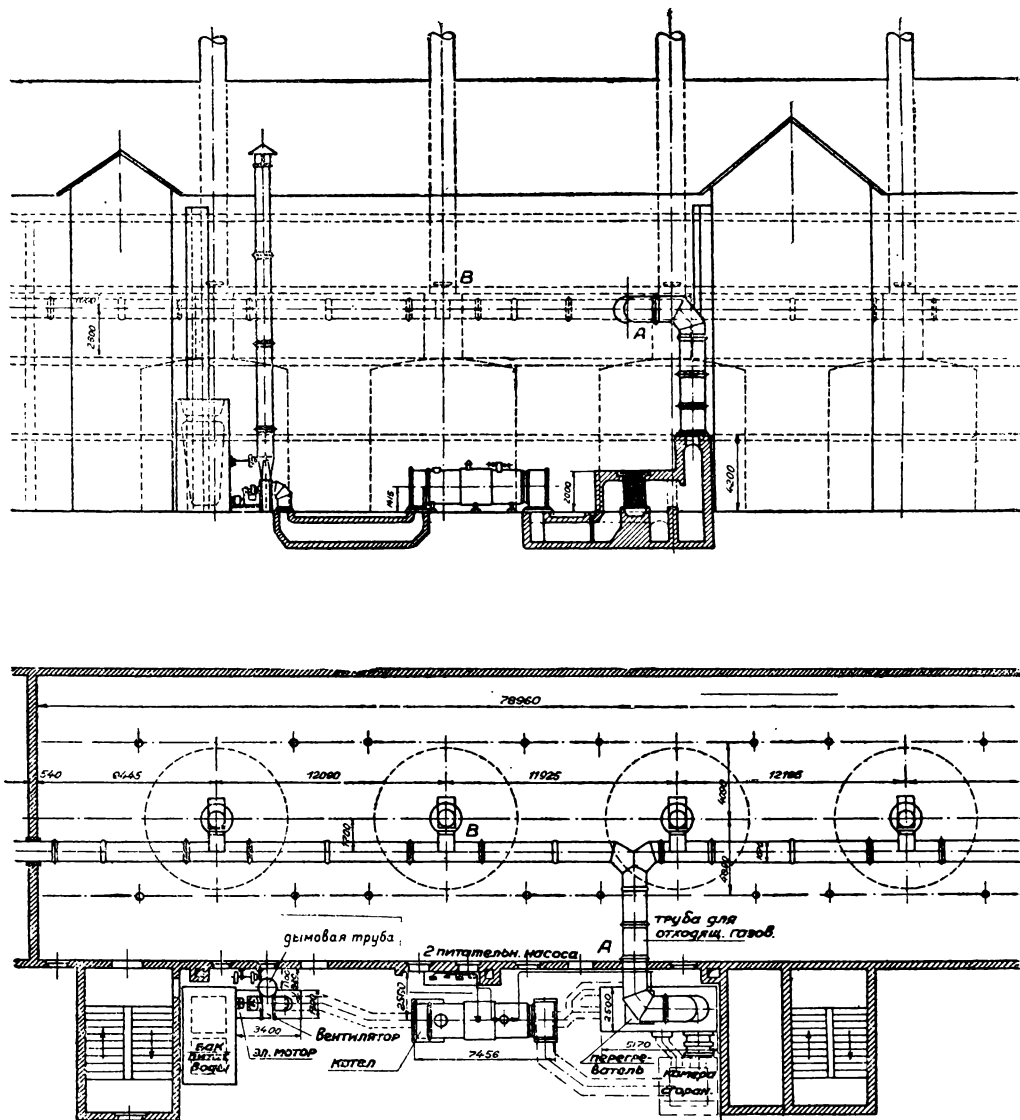


Рис. 111. Установка Бамаг-Мегуин

при их охлаждении, применяются котлы горизонтального типа с жаровыми трубами и пароперегревателями, дающие пар до 12 ат с перегревом в 350—400° С. Ввиду невысокой температуры отработавших газов, пароперегреватель устанавливается впереди котла (см. рис. 111). При использовании пара на производство механической и электрической энергии для обслуживания фарфорового завода, особое значение приобретает бесперебойная работа установки, которая может быть

обеспечена лишь при наличии достаточного числа горнов и регулярной их работе по твердо установленному графику. Чередование работы горнов и ремонта их должно быть организовано таким образом, чтобы было гарантировано непрерывное питание котла газами с температурой не ниже заданного предела. В зависимости от конечной температуры и режима обжига, период времени, в течение кото-

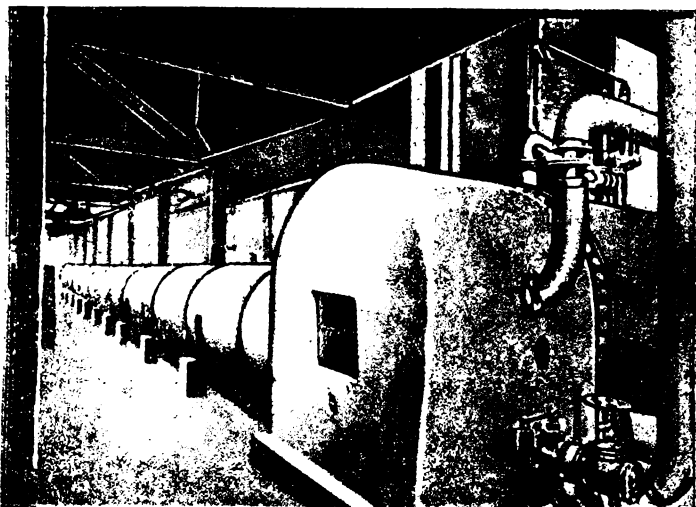


Рис. 112. Газопровод подвесной конструкции

рого отходящие дымовые газы и горячий воздух имеют у котла температуру порядка  $450\text{--}500^\circ\text{C}$ , колеблется в значительных пределах; точно так же меняется и расход времени на полный оборот горна. Поэтому количество горнов и расписание их работы, обеспечивающие равномерную выработку пара, устанавливаются в соответствии с производственными условиями каждого завода. Как правило, для регулярного использования тепловых отходов требуется бесперебойная работа 4—5 фарфоровых горнов.

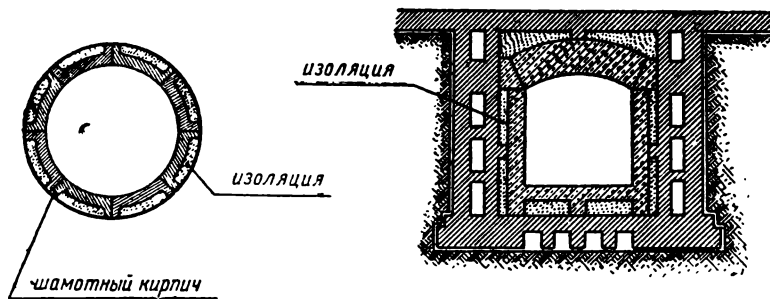


Рис. 113. Изоляция подвешенного и подземного газопроводов

Недостаточная подача в котел отработавших газов может привести к приостановке работы снабжаемых паром агрегатов и к перебоям в производстве. Поэтому при котлах утилизационных установок устраиваются резервные топки. Газовая резервная топка, показанная на рис. 114, может легче и быстрее других включаться для

обогрева котла и потому, при наличии на заводе газа, может применяться в качестве теплового резерва. Как видно из чертежа, для получения устойчивого очага горения топка имеет решетку из огнеупорного кирпича и присоединяется отдельным боровом к огневой коробке котла. Возможны и другие варианты резервных топок, если

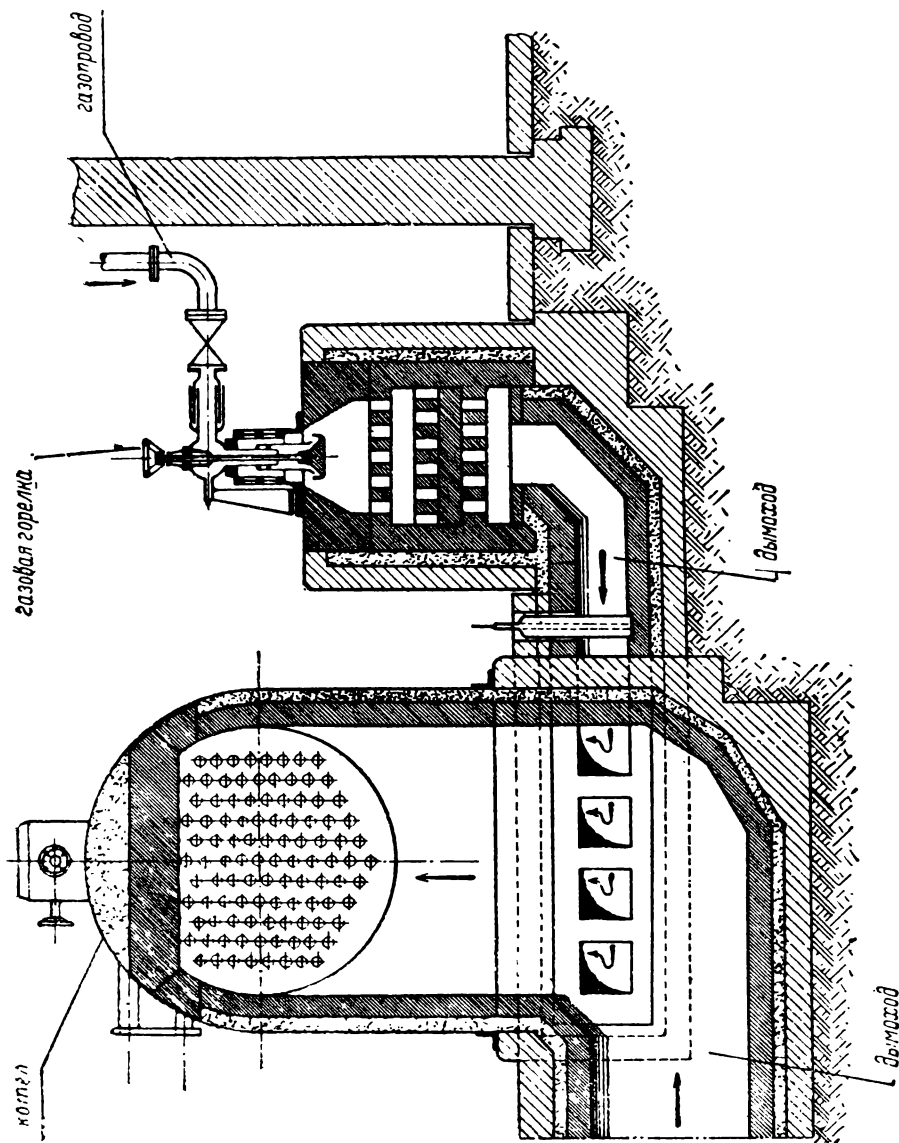


Рис. 114. Котел для утилизации тепла дымовых газов с резервной газовой топкой

в устройстве их предусматривается возможность быстрого включения в эксплуатацию.

На рис. 115 показан котел для утилизации тепла отходящих газов с резервной топкой для твердого топлива.

Тепловые потери фарфорового производства и количество утилизируемого тепла в установках Бамаг-Мегуин, по данным фирмы, представлены графически на рис. 116.

Тепло топлива, израсходованного за один обжиг, распределяется по следующим расходным статьям теплового баланса: нагрев фарфора — 2,5%; капсулей — 26%; кирпичной кладки — 27%; потери излучением, теплопроводностью и в очажных остатках — 12,5%; потери вследствие химической неполноты горения — 10%; остальные 22% составляет потеря с отходящими дымовыми газами. Не останавливаясь на некоторой приближенности в исчислении отдельных статей теплового баланса, необходимо отметить, что, по принципу работы установки Бамаг-Мегуин, дальнейшему частичному использованию подлежит тепло, израсходованное на нагрев фарфора — 2,5%, капсулей — 26%, кирпичной кладки — 27%, уходящих дымовых газов — 22% и горючих газов, уходящих в трубу, — 10%; всего 87,5%.

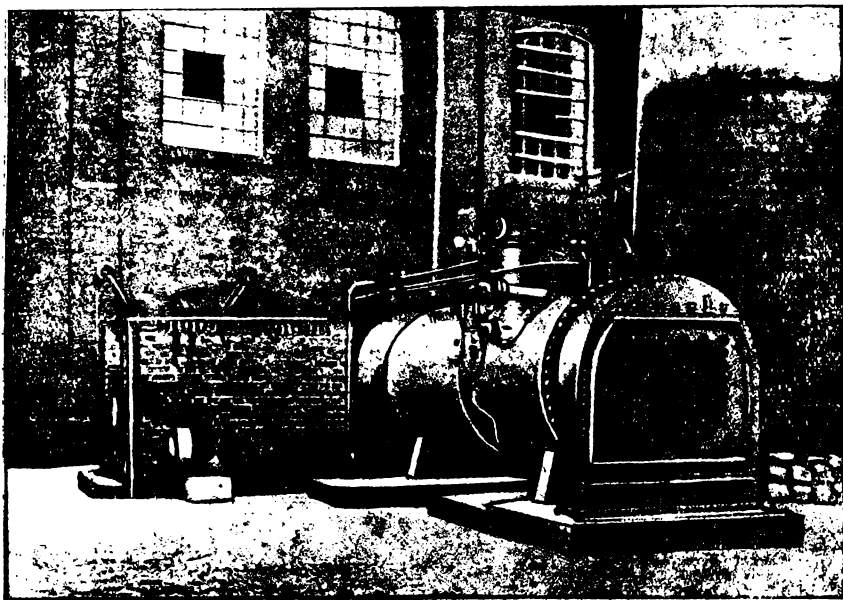


Рис. 115. Котел с резервной топкой для твердого топлива

Из этого количества для использования в паровом котле направляется с газами и воздухом, нагретыми выше  $500^{\circ}\text{C}$ , примерно, 56% тепловых отходов, из которых: теряется на излучение в трубопроводах до котла 7,5%, в самом котле — 3%, осваивается в котле и используется в виде пара 28% и уходит из котла с дымовыми газами 18%. Таким образом, около 28% тепла топлива, израсходованного в горне, можно использовать в установке типа Бамаг-Мегуин.

Дымовые газы с температурой ниже  $500^{\circ}\text{C}$  уходят в дымовую трубу без использования. Горячий воздух с температурой ниже  $500^{\circ}\text{C}$  может использоваться непосредственно на обогрев сушилок и помещений путем устройства приточно-вытяжных вентиляционных систем, что может дать дополнительную утилизацию 12—15% от общего расхода тепла, и, таким образом, общее количество утилизируемого тепла может подняться до 40—43% при расходе на нагрев фарфора 2,5%. Таким образом, введение в систему фарфоро-обжигательных горнов периодического действия котла в горне меняет картину топливоиспользования и отводит обжиг фарфора по удель-





находящегося в обжиге, что является весьма целесообразным для надежной эксплуатации печей. Замена естественной тяги, обусловленной атмосферными явлениями (ветрами, температурой и влажностью воздуха), искусственной, которая при надлежащем наблюдении может точно регулироваться по заданной кривой обжига, должна благоприятно отразиться на результатах обжига.

Паропроизводительность установки на заводе Каля, по данным фирмы, колеблется, в зависимости от температуры отходящих дымовых газов и горячего воздуха, от 900 до 2000 кг пара в час. Расписание работы горнов должно составляться с таким расчетом, чтобы максимальное количество тепла с дымовыми газами подавались в котел днем, в период максимального расхода пара. При использовании пара или горячей воды на отопление, иногда целесообразно устраивать тепловые аккумуляторы, с помощью которых в период малого расхода пара на производство электрической энергии аккумулируется тепло отработавших газов, передаваемое потом из аккумуляторов в сушилки и на отопление помещений. В общей системе заводского отопления конденсат собирается и обратным трубопроводом направляется в котел, что дает возможность избавиться от засорения котла накипью и в некоторых случаях позволяет обойтись без устройств для очистки питательной воды.

Фарфоро-фаянсовые заводы, оборудованные печами периодического действия, отличаются от заводов, вырабатывающих другие виды керамической продукции, весьма низким коэффициентом топливоспользования в обжиге. Поэтому проблема утилизации тепловых отходов имеет здесь весьма актуальное значение. В таблице 54 приводятся ориентировочные данные удельного расхода топлива на обжиг главнейших видов тонкой керамики в периодических печах, возможного использования тепловых отходов и расхода топлива на остальные нужды завода — на механическую и электрическую энергию и отопление.

Приведенные в таблице приближенные показатели освоения отработанного тепла периодических печей путем установки котлов (по типу агрегатов фирмы Бамаг-Мегуин) могут иметь разное значение, в зависимости от типа печей, режимов и конечных температур обжига. Сопоставление подсчитанных количеств утилизируемого тепла с его расходом на различные производственные нужды показывает, что при наличии печей периодического действия и надлежащей разработки конструкций установки возможно полное покрытие потребности за счет тепловых отходов.

Для фаянсового производства принят более низкий процент утилизации в соответствии с более низкими температурами отходящих газов и сокращением периода эффективного их использования. Как видно из сопоставления цифр, тепло отработавших газов также может покрыть все нужды производства.

При недостатке отбросного тепла возможно устройство у котла вспомогательной топки, либо обслуживание за счет утилизируемого тепла лишь части потребителей, например, только отопления. Неполное покрытие заводских нужд отбросным теплом, как правило, наблюдается при комбинированном печном хозяйстве завода, в котором имеются как печи периодического действия, так и более совершенные непрерывнодействующие, с малыми тепловыми отходами.

Намеченная схема использования тепловых отходов имеет существенный недочет, свойственный и другим устройствам, которые обслуживают лишь отопление сушилок и помещений: большие сезон-

ные колебания внешних температур приводят в летнее время к низкому коэффициенту использования установки, запроектированной на максимальный зимний расход тепла, так как отопление помещений отпадает, и расход тепла в сушилках сокращается.

Таблица 54

УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА НА ОБЖИГ ГЛАВНЕЙШИХ ВИДОВ ТОНКОЙ КЕРАМИКИ

Наименование продукции	Расход в $t$ условного топлива в $t$ (7000 кал/кг) на обжиг $1 t$ выпускаемой продукции	Возможная утилизация тепла из отходящих печных газов в процентах от расхода топлива на обжиг	Расход тепла на отопление, сушку и прочие производственные нужды в $t$ условного топлива на $1 t$ продукции	Характеристика печного хозяйства фабрики
Фарфоровая посуда крупного ассортимента (средний вес $1$ шт. = $0,435$ кг)	3,75	28	1,25	Политой и утильный обжиг в двухэтажных горнах периодического действия. Декорировочный обжиг в муфельных печах непрерывного действия
Производство низковольтных фарфоровых изоляторов (средний вес $1$ шт. = $0,725$ кг)	1,80	40	0,70	Политой и утильный обжиг в двухэтажных горнах периодического действия
Производство фарфоровой посуды (тонкий ассортимент) (средний вес $1$ шт. = $0,157$ кг)	4,16	28	1,00	Политой и утильный обжиг в двухэтажных горнах периодического действия. Декорировочный обжиг в муфельных печах непрерывного действия
Производство фаянсовой посуды (средний вес $1$ шт. = $0,318$ кг)	1,92	12	0,87	Две туннельные печи Фужерона и 6 двухэтажных горнов
Производство санитарного фаянса (умывальные столы, унитазы, баки и т. п.) (средний вес $1$ шт. = $10$ кг)	3,48	18	0,64	Круглые одноэтажные горны

Для более полного использования тепловых отходов целесообразнее строить установки с расчетом на полную силовую и отопительную нагрузку в летний период и дополнительное питание топливом через резервные топки зимой, когда расход тепла на обогрев сушилок и зданий, в общем, резко повышается. Экономический эффект уста-

новки для использования отходов тепла определяется при сравнении стоимости тепловой энергии, производимой обычными наиболее рациональными в местных условиях методами, и ее стоимости при установке утилизационной установки,

При условии тщательно продуманной конструкции описанных установок, надлежащей их эксплуатации и высокой температуры отходящих печных газов, целесообразность их устройства не вызывает сомнений.

#### IV. Воздушная рекуперация и регенерация тепла отработавших печных газов

Помимо описанных выше способов использования тепла дымовых газов и горячего воздуха, получаемых при обжиге и охлаждении керамических изделий в печах периодического действия, имеется ряд других схем утилизации тепла, получивших распространение в разных областях промышленности. Теплоносителем, который передает тепло из установки, утилизирующей тепло, к месту его использования в производстве, служит воздух, нагреваемый, как правило, не выше  $350\text{--}450^\circ\text{C}$ , во избежание преждевременного износа вентиляторов и железных трубопроводов. При циркуляции газов в огнеупорных каналах печных установок, их подогрев может доводиться и до более высоких температур в специальных устройствах, чаще всего выполняемых в одном блоке с производственными печами.

В разных отраслях промышленности получили широкое применение регенераторы и рекуператоры. Использование тепла отработавших дымовых газов путем регенерации требует минимум двух камер, загруженных насадкой (решеткой) из огнеупорного кирпича. На рис. 117 показана схема четырех генераторных камер, работающих попарно.

В то время как из печи  $A$  по каналам  $K$  через камеры  $R_1$  и  $R_2$  проходят горячие отработавшие газы, нагревают огнеупорную насадку и удаляются в атмосферу через каналы  $G$  и  $F$  и распределительные устройства  $V_1$  и  $V_2$ , холодный воздух поступает через те же распределительные устройства и каналы  $C$  и  $D$  в регенераторы  $R_3$  и  $R_4$  с нагретой ранее насадкой и, нагреваясь, подается каналами  $E$  в топку печи или же для использования на другие заводские нужды. По истечении некоторого времени насадка в камерах  $R_3$  и  $R_4$  охлаждается, а в камерах  $R_1$  и  $R_2$  нагревается за счет тепла отработавших печных газов. Тогда клапаны переключаются, и поток газов и воздуха направляется в обратную сторону: газы из печи проходят через регенераторы  $R_3$  и  $R_4$ , а холодный воздух через  $V_1$  и  $V_2$  подается на подогрев в камеры  $R_1$  и  $R_2$ .

Таким образом, путем поочередного переключения регенеративных камер то на подогрев находящейся в них кирпичной насадки за счет тепла отходящих печных газов, то на передачу аккумулированного тепла подогреваемому воздуху, получается непрерывное питание топков и других тепловых установок горячим воздухом.

При переключении регенеративной камеры с топочных газов на подогрев воздуха, последний смешивается с остатком газов в насадке и каналах, и потому его нельзя использовать для вентиляции и отопления рабочих помещений.

Наибольшее применение регенераторы получили в металлургической и стекольной промышленности. В мартеновских, стеклоплавильных и других печах, где требуется высокая температура пламени,

регенераторы используются для подогрева газа и воздуха, что дает возможность повысить температуру горения и теплоиспользование в этих печах. При нагреве газа и воздуха требуется устройство минимум четырех камер, как это показано на рис. 117. Регенеративные камеры в период разогрева отбирают много тепла на нагревание неактивной кладки стен самых камер (аккумуляция), и потому включение регенераторов на короткие сроки работы нецелесообразно.

В керамических печах регенераторы не получили применения, так как обжигаемые изделия сами могут играть роль регенеративной насадки: за счет накопленного в них тепла могут подогреться новые партии обжигаемой продукции. Это осуществляется в непрерывно действующих кольцевых и туннельных печах.

Достаточно благоприятные условия для применения регенераторов имеются лишь в производствах, где установлены периоди-

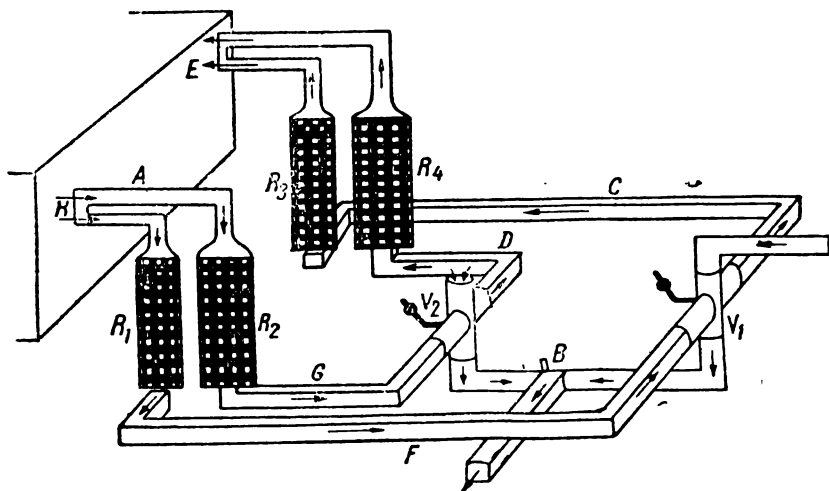


Рис. 117. Схема работы регенераторов

ческие печи, работающие на высоких температурах и с продолжительным периодом обжига. Однако, в виду стремления технической мысли к введению для всех тепловых процессов непрерывно действующих установок, область применения регенераторов в керамической промышленности остается весьма ограниченной. В области изготовления тугоплавких фритт для приготовления глазурей, а также в производстве эмалей, где, по существу, протекают процессы, сходные с плавлением стекла в ваннах и горшковых печах, использование регенераторов или рекуператоров для подогрева воздуха может оказаться весьма целесообразным, а в некоторых случаях и необходимым, например, при высоких температурах плавления и низкокалорийном топливе.

Рекуператоры по принципу своей работы действуют непрерывно и не требуют парных камер и клапанов для поочередного их включения, как в регенераторах. Поэтому они занимают меньше места и заслуживают предпочтения, когда невысокие температуры газов позволяют пользоваться герметическими металлическими трубами. В последнее время за границей начинают применять сварные трубы и пластинчатые рекуператоры из жароупорной стали, дающие весьма

высокий коэффициент полезной отдачи. Рекуператоры обладают значительно меньшей массой и меньше аккумулируют тепло. Поэтому они могут давать быстрый нагрев воздуха также при утилизации тепла дымовых газов периодических печей, тогда как регенераторы в периодических печах, как правило, не применяются.

В рекуператорах, как это видно из разреза, показанного на рис. 118, дымовые горячие газы непрерывно омывают трубы, через которые непрерывно протекает нагреваемый воздух. Таким образом, утилизация тепла горячих газов происходит путем передачи его циркулирующему воздуху через стенки рекуперативных труб и потому наиболее выгодные результаты получаются при устройстве рекуператоров из металлических труб, или же из огнеупорных материалов (типа шамота), в состав которых введен карборунд, отличающийся довольно высокой теплопроводностью.

Применение металлических рекуперативных труб, главным образом чугунных, например в рекуператорах Моргана, дает возможность подогревать воздух до температуры порядка 400—500° С при достаточно продолжительной службе труб (при нагреве выше 700° С трубы из чугуна или жароупорной стали быстро прогорают). Пользуясь металлическими трубами, можно обеспечить достаточно герметическое их сопряжение и получать горячий воздух без подсоса дыма или же засоса воздуха в дымовую трубу, тогда как огнеупорные трубы выдерживают нагрев до 1000—1200° С, но неизбежно со временем дают трещины и щели, сообщающие каналы отработанных газов с каналами, по которым протекает воздух.

При этом, если разрежение в дымовых каналах больше, чем в воздушных, то воздух засасывается в дымовую трубу, что дает снижение разрежения в печи и резкое нарушение ее нормальной работы. Если же, наоборот, нагреваемый воздух отсасывается (например в сушилки) под большим разрежением, чем дымовые газы, то последние через щели в рекуперативных трубах попадают в воздух, что иногда исключает возможность его использования, вследствие опасности попадания загрязненного воздуха в рабочее помещение.

На возможность образования трещин в огнеупорных трубах рекуператоров, влекущее за собой засосы воздуха или дымовых газов, необходимо обращать надлежащее внимание при проектировании и эксплуатации установок.

Основное стремление конструкторов керамических рекуператоров направлено к обеспечению наибольшей плотности в стыках керамических труб, фасонных камней и разработке таких форм отдельных деталей, которые наименее подвержены термическим разрушениям и облегчают сборку рекуператора в целом.

Одним из наиболее простых по конструкции керамических рекуператоров является рекуператор Штейна, получивший распространение в металлургических, стеклоплавильных и керамических печах.

Как видно из рис. 119, этот рекуператор состоит из прямоугольных коротких керамических труб, имеющих внутренние перегородки *а* и наружные выступы *б*. Трубы устанавливаются в рекуперативной камере одна на другую плотными рядами, между которыми образуются горизонтальные щелевидные каналы, ограниченные снизу подом камеры и перекрытые сверху огнеупорным настилом *в*. Внутри вертикальных труб, обычно, сверху вниз проходят отработавшие топочные газы и, отдавая часть тепла через стенки рекуперативных труб, уходят в дымоотводящий боров. По горизонтальным межтрубным каналам протекает подогреваемый в рекуператоре воздух. В целях

уплотнения щелей в стыках керамических труб и большей устойчивости кладки рекуператора, в горизонтальных воздушных каналах на закраинах рекуперативных труб плотно укладывается по одному ряду огнеупорного кирпича 2. Высота выступов (закраин) на трубах и толщина кирпича установлены с таким расчетом, чтобы горизонтальные ряды кирпича в воздушных каналах перекрывали все щели между вертикальными трубами. Кроме того, горизонтальные ряды плоского кирпича не дают возможности сдвигаться торцам установленных друг на друге керамических труб во время неизбежного сдвига

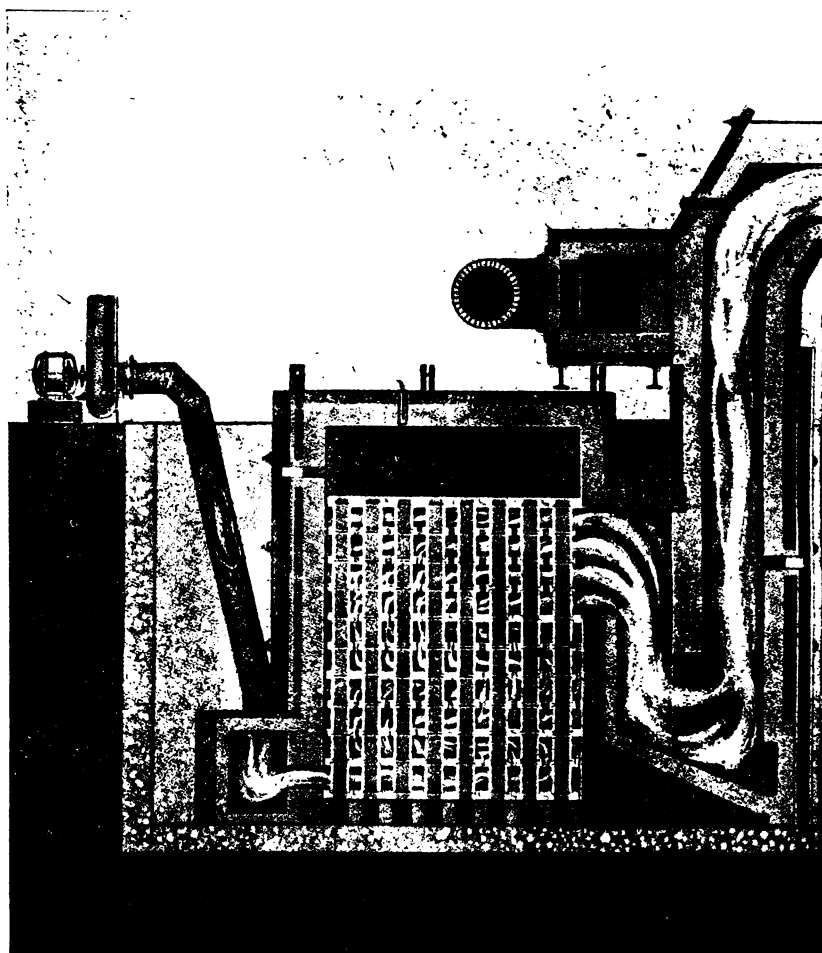


Рис. 118. Схема работы рекуператора

в кладке рекуператора под влиянием переменных его нагревов и охлаждений. Как видно из рисунка и описания, в рекуператоре Штейна простыми средствами достигается уплотнение швов, зависящее при любой конструкции рекуператора, главным образом, от точности размеров отдельных его элементов, качества кладки и постоянства работы. Частые и резкие охлаждения и нагревы керамического рекуператора приводят, обычно, к засосам воздуха в дымоходы или, наоборот, к засосам дыма в воздух — в зависимости от разности давлений в воздушных и дымовых каналах.

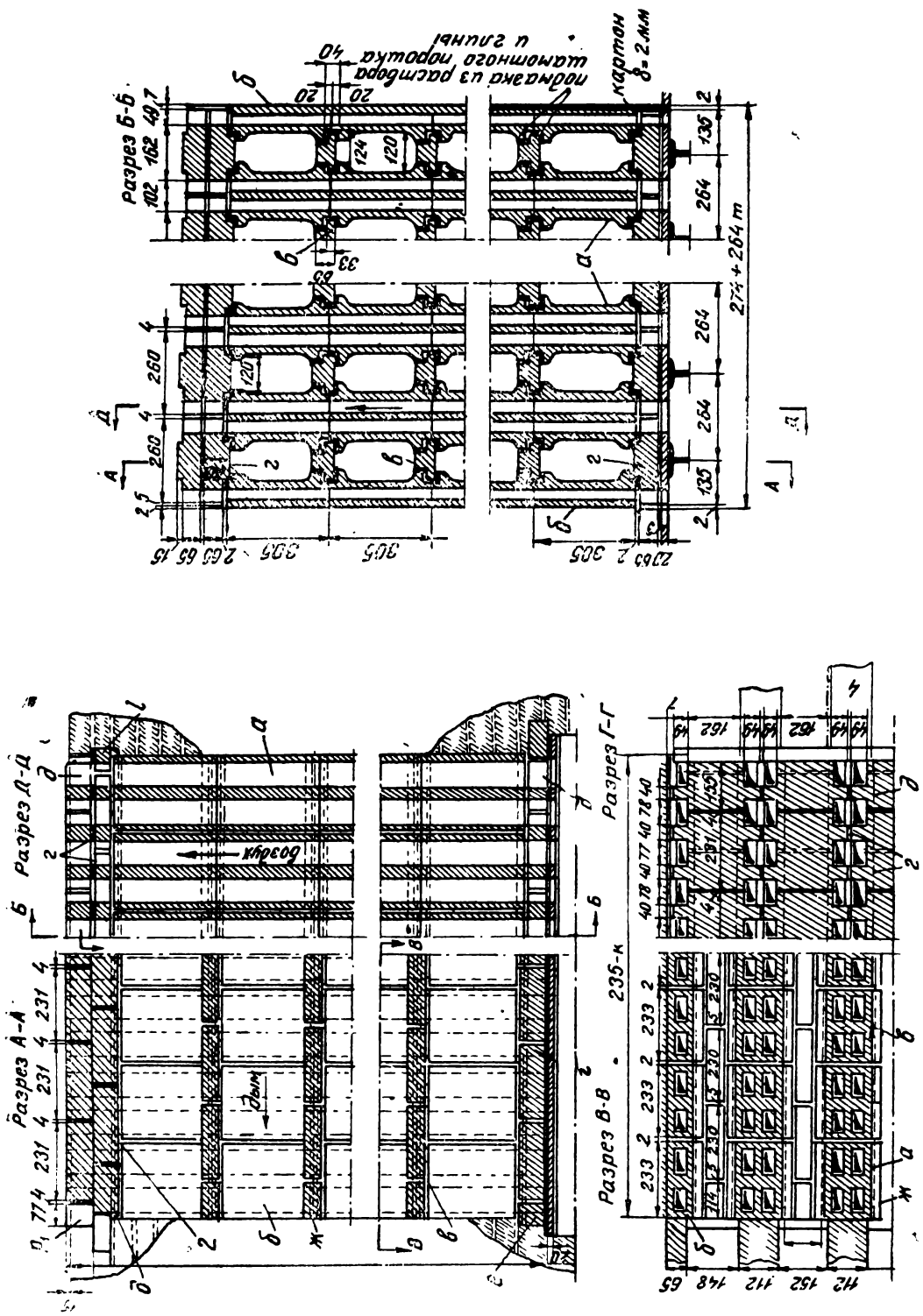


Рис. 119. Рекуператор Штейна



Существует несколько приемов расчета производительности рекуператоров и выбора размеров, соответствующих проектному заданию. На основе расчетов можно составить графики, дающие возможность с достаточной точностью ориентироваться в этой области при решении отдельных вопросов производственной практики.

На рис. 120 приводятся графики для расчета необходимой поверхности керамического рекуператора по заданной производитель-

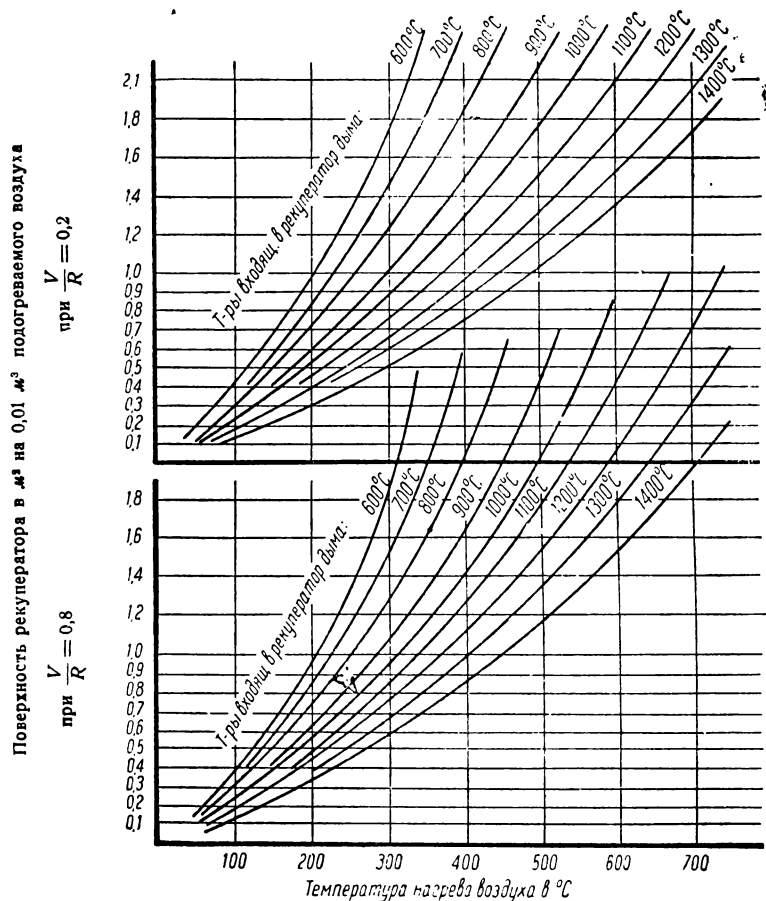


Рис. 120. График для расчета поверхности керамических рекуператоров

ности, заимствованные из курса лекций инж. А. В. Грум-Гржимайло. При пользовании графиками, для значений  $\frac{V}{R}$  (где  $V$  — секундный расход воздуха, а  $R$  — секундный расход дыма, проходящих через рекуператор в  $\text{м}^3$ ), промежуточных между принятыми  $\frac{V}{R} = 0,8$  и  $\frac{V}{R} = 0,2$ , необходимо путем интерполирования принимать данные, соответствующие заданному соотношению секундных количеств воздуха и дыма.

Графики дают довольно близкие к действительным данные, когда рекуператоры работают без засосов. На рис. 121 показана конструкция

труб соединительных рамок и кладки рекуператора фирмы The Amsler Morton Co, а на рис. 122 — элемент конструкции чугунного рекуператора Моргана. Рекуператоры (главным образом металлические) могут иметь в керамической промышленности наибольшее применение при использовании тепла отходящих газов для нагревания воздуха на отопление сушилок и заводских помещений, а также и в некоторых печах специального назначения.

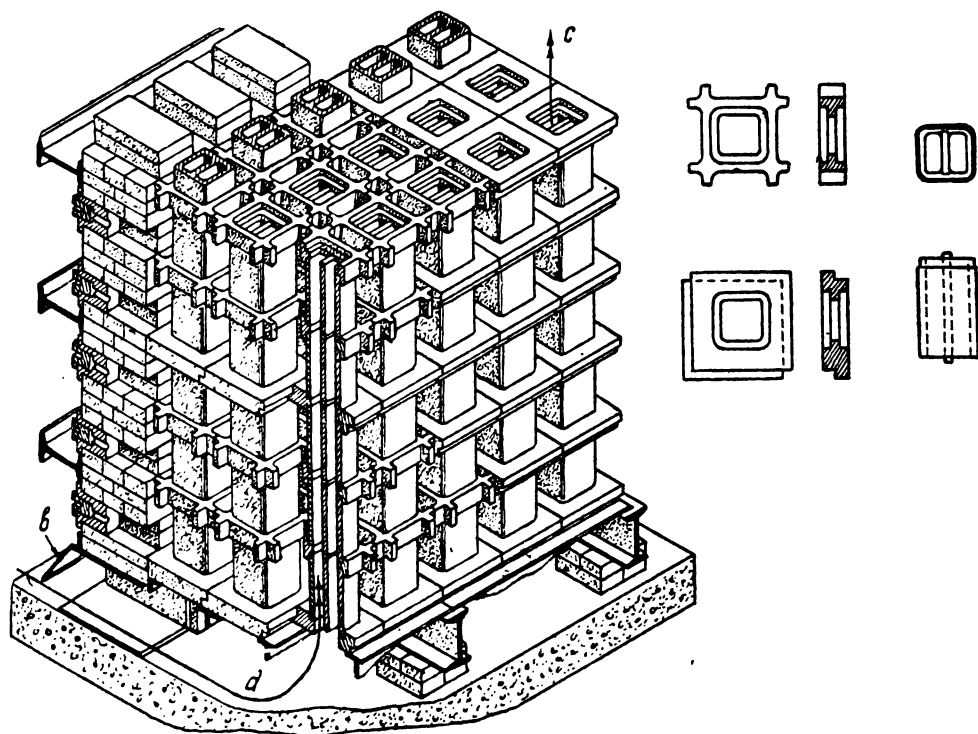


Рис. 121. Конструкция рекуператора Амслер Мортон K<sup>0</sup>

*b* — опорная балка; *c* — выход воздуха из рекуператора; *d* — вход воздуха в рекуператор

Вопросам конструкции рекуператоров уделяется достаточное внимание в специальной технической литературе.

В таблице 55 приводятся данные проф. Тиме для приблизительного расчета чугунных рекуператоров.

Таблица 55

Температура нагретого воздуха в С°	Потребная поверхность нагрева труб в м <sup>2</sup> на 1 м <sup>3</sup> нагретого воздуха в 1 мин.
150	0,6
250—300	0,75—1,0
300—350	1,0—1,5
400—500	3,0—4,0
500—600	5,0

На рис. 123 даны графики для определения поверхности чугунных рекуператоров Моргана, построенные таким же методом, как и графики для керамических рекуператоров.

Воздушная рекуперация тепла отработавших печных газов имеет для некоторых керамических заводов эксплуатационные преимущества перед использованием этого тепла путем нагрева воды или

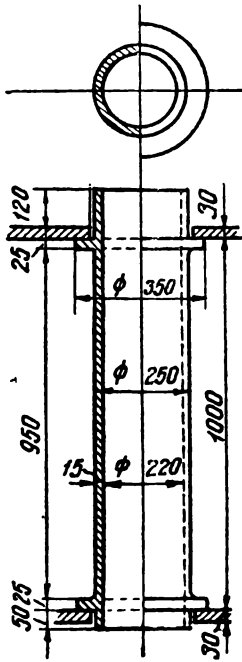


Рис. 122. Конструкция элемента рекуператора Моргана.

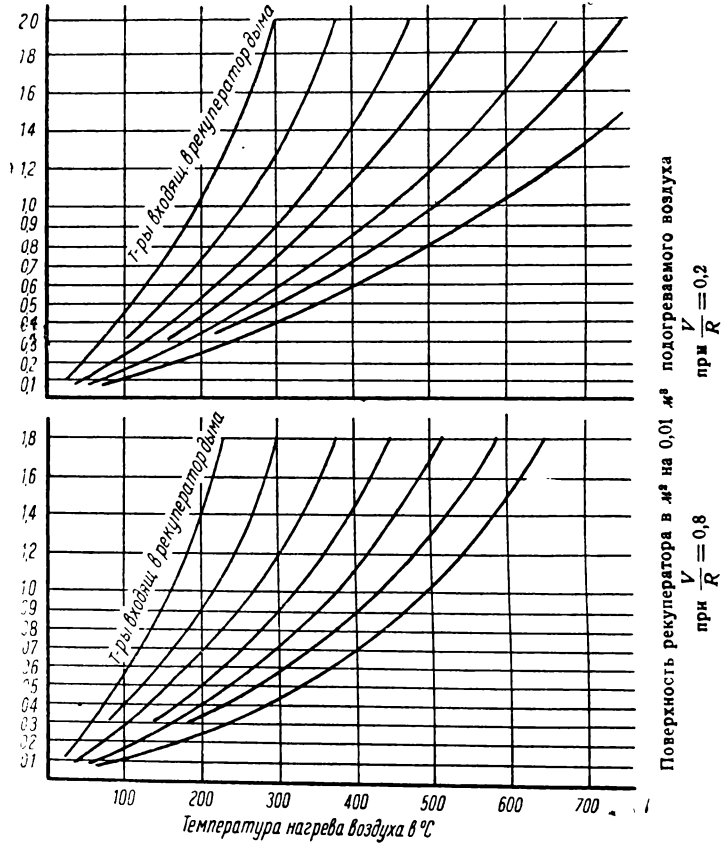


Рис. 123. Графики для расчета поверхности чугунных рекуператоров Моргана

получения пара в специальных котлах. Для установления наиболее целесообразного метода утилизации тепла отработавших газов в производстве, необходимо в каждом отдельном случае иметь сравнительные техно-экономические расчеты, в которых должны быть учтены также и все факторы эксплуатационного порядка, например, простота и дешевизна обслуживания, потребность в ремонтах и связанный с этим простой производственного оборудования и пр.

## ГЛАВА СЕДЬМАЯ

### ТЕПЛОВЫЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

#### I. Сравнительная характеристика установок периодического и непрерывного действия

В современных условиях непрерывно действующие печи и сушилки постепенно вытесняют установки периодического действия, благодаря ряду технических и экономических преимуществ поточной тепловой обработки керамических изделий.

Первые попытки использования туннельных печей и сушилок непрерывного действия, вследствие отсутствия опыта в этой области и неудовлетворительной проработки конструкций, давали в некоторых случаях малоудовлетворительные показатели, что задерживало внедрение этих установок на керамических заводах. Расширение действующих заводов, постройка крупных новых предприятий, переход на более прогрессивные методы непрерывно-поточной работы требовали высокопроизводительных регулярно-работающих агрегатов.

Параллельно с увеличением спроса на непрерывно-действующие установки, быстро продвигалось изучение их работы, конструктивная разработка отдельных типов таких установок для разных отраслей керамики.

Ряд фирм в США и других странах специализировался на оборудовании теплового хозяйства разных отраслей промышленности и с успехом использует накопленный опыт также при оборудовании современными установками заводов керамической промышленности.

Все новостроящиеся и реконструируемые заводы крупного массового производства, как правило, оборудуются печами и сушилками непрерывного действия, что объясняется техническими преимуществами и выгодностью этих установок по сравнению с печами и сушилками периодического действия.

Основной особенностью работы непрерывно действующей печи или сушилки является непрерывная подача в них полуфабриката для соответствующей тепловой обработки и такая же непрерывная выгрузка изделий по окончании намеченного процесса. Примером непрерывной загрузки является подача сырой дробленой глины из питательной воронки во вращающийся сушильный барабан или подача вагонеток с полуфабрикатом в туннельную печь. Как правило, вагонетки проталкиваются вперед через установленные проме-

жутки времени. Поэтому, строго говоря, этот способ подачи вагонеток нельзя назвать непрерывным. Тем не менее, частая и ритмическая подача полуфабрикатов отдельными порциями, при большой продолжительности теплового процесса, не дает оснований считать процесс периодическим и не мешает использованию всех преимуществ непрерывной обработки.

При непрерывной выдаче из печи или сушилки обработанных изделий происходит непрерывное их перемещение вдоль канала или камеры печи и устанавливается жесткая зависимость времени пребывания полуфабриката внутри агрегата (от загрузки данной партии до ее выгрузки) от установленной продолжительности тепловой обработки, а именно:

$$\frac{L}{v} = t,$$

где

$t$  — продолжительность тепловой обработки — величина постоянная для заданных условий производства и продукции;

$v$  — скорость перемещения полуфабриката в печи или сушилке и скорость выгрузки готовой продукции — определяет пропускную способность установки; чем выше скорость  $v$ , тем больше выпуск продукции;

$L$  — длина пути, проходимого полуфабрикатом в процессе обжига или сушки; в основном определяет размеры установки в направлении потока изделий и ее производительность.

Продолжительность теплового процесса устанавливается на основании практических данных или опытным путем, в зависимости от вида керамической продукции, предъявляемых к ней технических требований, состава массы и принятого режима тепловой обработки (температуры, влажности воздуха и т. п.).

Из приведенного выше равенства видно, что для получения высокой производительности, т. е. для увеличения скорости перемещения полуфабриката при определенно установленной продолжительности процесса  $t$ , необходимо одновременно с увеличением скорости  $v$  увеличивать длину проходимого пути  $L$ , т. е. увеличивать габариты установки в этом направлении и, наоборот, при меньшей производительности можно пользоваться печами меньшей длины.

При заданных габаритах установки и, следовательно, предопределенной длине пути  $L$ , увеличение выпуска возможно только за счет сокращения продолжительности тепловой обработки, если это не влечет за собой ухудшения качества продукции или иных осложнений в производстве.

Производительность установок  $Q$  определяется, помимо скорости прохождения изделий через агрегат  $v$ , еще и количеством их на 1 м длины потока продукции —  $q$ :

$$Q = q \cdot v.$$

Если для туннельной печи:

$$v = 1,5 \text{ м/час},$$

$q$  — нагрузка на 1 пог. м поезда вагонеток, допустим, 300 кг фарфора,

то часовая производительность печи будет:

$$Q = 300 \cdot 1,5 = 450 \text{ кг}.$$

Увеличение мощности нагрузки на 1 м потока  $q$ , так же, как и увеличение скорости  $v$ , дает прямое увеличение выпуска установки.

Для туннельных печей и сушилок повышение загрузки 1 м потока достигается за счет увеличения используемого сечения канала печей.

Непрерывное перемещение изделий в процессе теплообработки вдоль камер или каналов дает точный график местонахождения в них любой вагонетки в определенные отрезки времени. С другой стороны, для каждого вида изделий, в соответствии с намеченным режимом обжига, для тех же отрезков времени требуются определенные температура и состав дымовых газов. Поэтому для соблюдения правильного режима обработки в каждой зоне непрерывно действующих печей и сушилок должны поддерживаться температура и состав газовой среды в заданных пределах, а перемещение обрабатываемого полуфабриката должно производиться регулярно, по установленному регламенту.

Как отступление от намеченного теплового режима, хотя бы на одном участке туннельной печи, так и несвоевременное перемещение изделий в смежную зону с другими температурными условиями, нарушает намеченный процесс тепловой обработки и, обычно, служит причиной ухудшения качества продукции и отдельных показателей работы тепловой установки.

В некоторых случаях даже довольно грубые упущения в регулировке работы печей и сушилок и нарушения установленного порядка пропуска продукции (по причине плохой организации работы в цехах) не вызывают резкого сокращения выхода и ухудшения качества продукции.

Причиной такого кажущегося „благополучия“ являются чрезвычайно большие запасы времени, допущенные при назначении режима и продолжительности сушки или обжига.

Назначение преувеличенного времени для сушки или обжига снижает производительность и тепловые коэффициенты полезного действия установок, открывает широкий путь для небрежного обслуживания и регулирования последних, так как большие резервы сглаживают нарушения режима.

Одновременно с уточнением регулировки печей, налаживанием контроля их работы и повышением уровня технического обслуживания, следует уточнять режим сушки или обжига для улучшения качества выпускаемой продукции, сокращения периода тепловой обработки и повышения пропускной способности агрегатов.

Сушка и обжиг в установках непрерывного действия имеют ряд особенностей, обусловленных перемещением продукции в процессе обработки и составляющих основное преимущество непрерывного процесса по сравнению с теплообработкой периодическими циклами.

Почти все непрерывно-действующие сушилки и печи работают по принципу противотока: обрабатываемая продукция на вагонетках, с помощью конвейеров и других транспортных приспособлений или самотеком по вертикальной шахте, перемещается навстречу дымовым газам, горячему воздуху и другим агентам теплообработки.

Использование тепла горячих газов происходит при этом на длинном пути. Газы многократно омывают встречный полуфабрикат и постепенно охлаждаются до максимально выгодных пределов. При этом полуфабрикаты плавно подогреваются и обеспечивается относительно равномерная и высокая разница температур дымовых газов и обжигаемой продукции на протяжении всего периода обжига.

В печах и сушилках периодического действия кривые обжига и сушки зависят от работы обогревающих устройств и топок, паро-

вых радиаторов, подачи горячего воздуха и потому могут быть весьма разнообразными.

Ослабление или временное прекращение подачи горячих газов в камеру (умышленное или вследствие недосмотра обслуживающего персонала) может на известное время задержать повышение температуры: она остается на одном уровне и даже понижается. Это часто можно наблюдать на температурных графиках обжига в круглых фарфоровых горнах и других печах.

Непрерывно действующая печь должна иметь в топочной зоне постоянные температуру и газовую среду. В тех зонах конвейерных и туннельных сушилок, куда подается свежий воздух, его температура, влажность и давление должны также поддерживаться на определенно установленном уровне, обеспечивающем нормальную сушку.

По мере движения газов навстречу обогреваемой продукции, понижается их температура и меняется состав, а температура изделий непрерывно повышается. При отсутствии специального регулирования температуры в печах и сушилках непрерывного действия, кривая температур имеет более или менее плавный подъем; угол наклона кривой на отдельных участках зависит от затраты тепла на обогрев изделий и на химические процессы, в них происходящие, от потерь тепла в окружающую среду, от разбавления газов, засосанных сквозь щели холодным воздухом, и от условий теплопередачи от газов к продукции, которые являются сложной функцией разницы температур газов и твердых тел, теплопроводности, лучеиспускания и т. д.

Удерживать температуры обогреваемых изделий на одном уровне, при их перемещении в более горячие зоны печи или сушилки, без специальных устройств не представляется возможным, так же как и провести обжиг с временным понижением температуры.

В массовом производстве тонкой и грубой керамики практически не встречается нужды в задерживании температуры на одном уровне или в понижении ее, и заданный режим обжига достигается сравнительно простыми, описанными ниже, методами регулирования повышения температуры в зоне предварительного нагрева.

Нет никаких препятствий к разработке специальных конструкций непрерывно действующих печей, в которых можно было бы в период обжига давать длительную выдержку на одном уровне, но для этого потребовалось бы устраивать дополнительные топки и усложнить конструкции газоотводящих каналов, в чем вряд ли может возникнуть необходимость при выпуске керамической продукции обычного ассортимента.

Керамические изделия специальных видов (например фарфор с кристаллическими глазурями), ввиду ограниченного их выпуска и особых требований к режиму обжига, целесообразнее обжигать в небольших периодических печах, где можно проводить обжиг небольших партий по разнообразным режимам, без нарушения планомерного производства продукции массового ассортимента.

Помимо особенностей самого теплового процесса, непрерывно действующие печи и сушилки резко отличаются от установок периодического действия методами регулирования работы топочных и других устройств.

В установках периодического действия для сушки или обжига керамических изделий, в соответствии с заданным режимом, необходимо в определенные периоды изменять подачу топлива, воздуха,

пара, непрерывно наблюдать за ходом процесса и регулировать тягу и распределение температур по отдельным участкам камеры.

Управление работой этих установок требует напряженного внимания для приближения температур и состава среды к заданным. Такого внимания требует каждый новый цикл (оборот) печи или сушильной камеры, так как на заводах еще нет механизмов, которые могли бы автоматически, по проверенным кривым, регулировать довольно сложный процесс, зависящий от многих переменных.

При непрерывной обработке изделий, необходимо в период пуска и наладки отрегулировать подачу топлива, газа, горячего воздуха и пр. в зону высокой температуры и обеспечить согласованный с принятым режимом обжига или сушки перепад температур в зонах предварительного подогрева и охлаждения. В дальнейшем, при регулярной подаче изделий, процесс может проходить без регулировки, впредь до изменений в ассортименте выпускаемой продукции и составе топлива, засорения трубопроводов и каналов и т. п. отступлений от первоначальных условий работы.

Обслуживание непрерывно действующих установок упрощено и в условиях нормальной работы сводится к наблюдению за бесперебойной работой аппаратуры.

Оборудование для автоматической регулировки работы может здесь иметь большое применение, так как в ее задачу входит лишь сохранение стабильных условий теплообработки в отдельных зонах, что несравненно легче выполнимо, чем автоматическое изменение этих условий, в соответствии с намеченным режимом в установках периодического действия.

Упрощение задач, стоящих перед автоматической регулировкой, облегчает надежную наладку работы термостатов, стабилизаторов влажности и тому подобных контрольно-регулирующих механизмов.

Использование тепла в установках непрерывного действия гораздо выше, чем в установках с периодическим циклом работы, так как в первых горячие газы проходят длинный путь, и, омывая значительное количество поступающих навстречу изделий, успевают отдать большую часть тепла в самых печах или сушилках.

В печах и сушилках периодического действия путь, проходимый горячими газами, весьма ограничен требованиями равномерности обогрева стабильно размещенной продукции, определяющими размеры камер и длину пути, проходимого обогревающим агентом. Поэтому для использования больших количеств тепла, остающегося в отработанных газах, требуется устройство специального оборудования, довольно сложного и дорогого в эксплуатации.

При оценке работы тепловой установки и определении коэффициента полезного действия, все тепло отработанных газов, хотя бы они находили частичное использование в производстве, и тепло, уходящее в окружающую среду вследствие излучения, считается потерей, и величина этой потери является основным критерием при определении эффективности теплоиспользования.

Как правило, коэффициент полезного действия всех непрерывно действующих теплоустановок выше, чем периодических. Преимущества непрерывно действующих установок особенно резко выявляются при высоких температурах теплообработки, когда использование тепла в печах с периодическим циклом крайне недостаточно.

В работе периодических печей и сушилок имеются две операции, когда тепловая установка, как таковая, не работает: это — выгрузка из камер готовых изделий и загрузка новых.



Вполне понятно стремление производственников сократить нерабочий период и проводить выгрузку и загрузку камер в короткие сроки, в то время как на смежных участках производства, например, на глазуровке, заборке и выборке капсулей, работа производится непрерывно с более или менее равномерным часовым выпуском.

Этот разрыв между непрерывной работой подготовительных стадий производства и периодической работой печей является крупным технико-организационным недостатком. Он является одной из причин часто встречающейся неудовлетворительной работы горновых цехов.

Для быстрой загрузки камер необходимо либо заготавливать у каждой камеры большие запасы вполне подготовленной загрузки, либо транспортировать ее на большие расстояния к очередным загружаемым камерам.

В первом случае необходимо иметь повышенные запасы полуфабрикатов, во втором — нести дополнительные расходы на транспорт; в обоих случаях получается повышенный выход боя и брака.

Загрузка печных камер весьма часто проводится в условиях, неблагоприятных для работы и вредных для здоровья рабочих, — в тесноте, при высокой температуре (60—100° С). В целях повышения оборачиваемости горнов производственники вынуждены мириться с этим крупным недостатком печей периодического действия, так как удлинение периода охлаждения печи и обслуживание загрузки и разгрузки камер небольшим штатом рабочих, хотя и дало бы повышение производительности труда, принесло бы большой убыток из-за сокращения выпуска продукции.

Эти противоречия, возникающие при форсировании работы периодических печей, являются органическими недостатками периодического цикла теплообработки; предлагаемые для смягчения этих недостатков мероприятия (например усиленное искусственное охлаждение горнов) не могут полностью их ликвидировать.

Организация работы по загрузке и выгрузке камер весьма затруднительна, так как на сравнительно короткое время необходимо собирать крупные бригады, равномерно распределить работу которых в суточном и шестидневном разрезе иногда не представляется возможным.

Сочетание графика работы горнов и выходов рабочих при неодинаковых размерах камер и оборачиваемости, например от трех до четырех и выше суток, в зависимости от ассортимента и размера камер, — является весьма сложной, часто практически плохо разрешаемой задачей.

Использование тепловых отходов периодических печей для регулярного отопления помещений и сушилок также встречает затруднения. Разрывы в непрерывном чередовании работы периодических печей или их недостаток требуют установки сравнительно дорогого парового резерва большой мощности.

Отсутствие же парового резерва вынуждает в холодные зимние месяцы строить график работы печей, преимущественно, ориентируясь на равномерную подачу тепловых отходов в цеха, часто в ущерб работе самих печей и горнового цеха в целом (например обжигать с неполной или некомплектной загрузкой, чтобы не заморозить формовочный отдел, и т. п.).

Совершенно иная производственная обстановка получается при эксплуатации печей и сушилок непрерывного действия. Рабочие места смежных с сушкой и обжигом стадий производства размещаются соответственно мощности агрегатов и в непосредственной близости

от путей следования полуфабрикатов в теплоустановки и обратно. Работа идет размеренным темпом с минимальными резервами полуфабриката, которые, как правило, не являются оперативными текущими запасами, а используются лишь в случае непредвиденных прорывов на каком-либо участке производства.

Устранение задержек полуфабриката в тепловой обработке открывает весьма благоприятные перспективы широкого использования непрерывно-поточных методов производства с ускорением с увеличением выпуска, сокращением расхода рабочей силы, улучшением организации труда и другими преимуществами поточной работы. Переход на непрерывно действующие печи и сушилки бесспорно является серьезным стимулом к внедрению поточной работы в цехах и уплотненному использованию оборудования предприятия.

Непрерывно-поточной сушке и обжигу принадлежит ведущая роль в деле реконструкции керамических производств.

## II. Шахтные печи для обжига кварца, шпата и глин

Шахтные печи применяются в керамических производствах для обжига кремня, кварца, глины на шамот, а также полевого шпата для лучшего отделения примесей. В отношении использования тепла

и удобств эксплуатации, шахтные печи являются весьма экономичными, вполне современными непрерывно действующими установками с высокой производительностью при незначительном расходе обслуживающей рабочей силы и могут с успехом заменить камерные печи, применяемые на фарфоровых и фаянсовых заводах для обжига материалов.

Существуют три способа обжига материалов в шахтных печах. В одних печах нагрев производится пламенем, получаемым в газовых или иных топках. В других (так называемых пересыпных) печах горячее забрасывается в шахту послойно вместе с обжигаемыми материалами; в этом случае сгорание топлива происходит в самой шахте за счет воздуха, протекающего через зазоры между отдельными кусками топлива и материала. Наконец, при обжиге углистых глин, глинистых горючих сланцев и брикетов, приго-

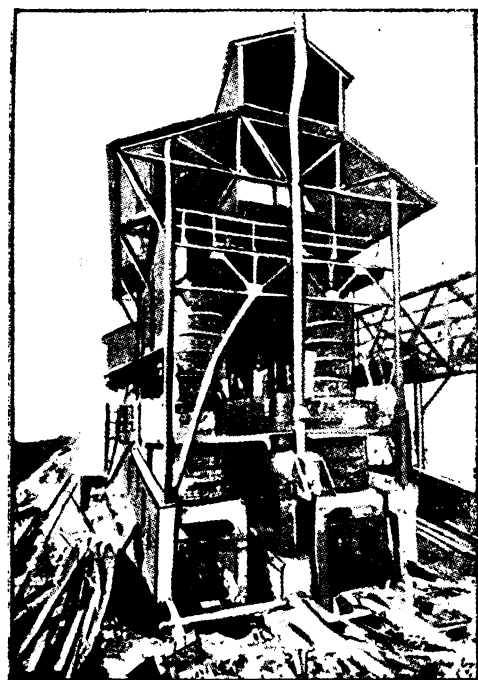


Рис. 124. Шахтные печи для обжига кремня и кварца

товленных из смеси низкосортного топлива и обжигаемого материала, обжиг происходит за счет выгорания топлива, тонко распределенного в материале; процессы, протекающие при этом способе обжига, весьма напоминают сжигание или газификацию многозоль-

ных углей с той разницей, что получаемая здесь в больших количествах зола является основным продуктом производства.

Шахтные печи для обжига кремневой гальки или кварца имеют наиболее простую конструкцию, так как обжиг этих материалов не вызывает особых затруднений. Шахтные печи для обжига гальки с газовым отоплением описаны А. Хиртом.<sup>1</sup> Батарея из шести печей, расположенных в два ряда по три в каждом блоке, показана на рис. 124.

Производительность каждой печи 12—14 т в сутки. Печи отапливаются газом, получаемым из центральной газогенераторной установки. Движение газов через загрузку шахты обеспечивается вентилятором мощностью в 0,6 л. с., а непрерывная загрузка шахты — автоматическим выгрузителем мощностью в 2,5 л. с.

Воздух, охлаждающий обожженную гальку и нагретый до высокой температуры, подается из зоны охлаждения в зону обжига, чем обеспечиваются, при наличии большой контактной поверхности раскаленной гальки, хорошие условия для сжигания газа и высокий коэффициент полезного действия печи.

По данным Хирта, при температуре отходящих газов около 65°C и температуре выгружаемой гальки в 50—60°C расход топлива для обжига последней при температуре в 1400°C колеблется (с учетом потерь в газогенераторах) около 6—7% от веса сырого материала. Высокая температура обжига вряд ли оправдывается технологическими требованиями, при более же низкой температуре следует ожидать некоторого понижения расхода топлива. А. Хирт в упомянутой статье дает характеристику своих печей, имеющих устройство для подсушки глины и приводит диаграммы использования тепла и объемов газа, протекающего через шахту, придавая этому фактору весьма важное значение, и сопоставляя свои печи с шахтными печами, работающими по простой схеме противотока (рис. 125 и 126): слева—схема противотока, а справа—схема печи с отбором части газов для предварительной подсушки материала.

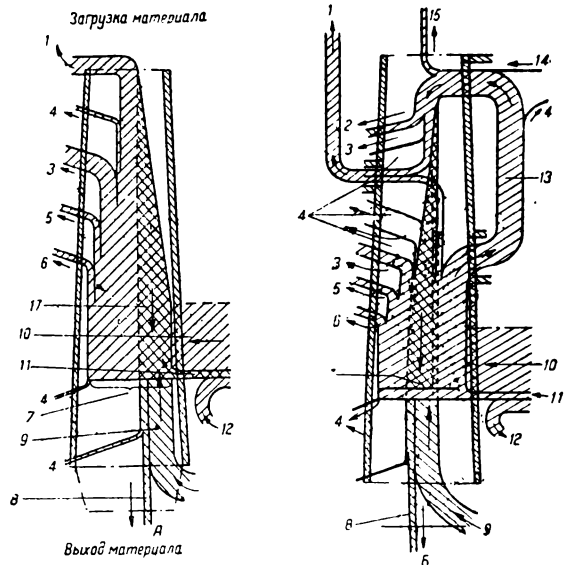


Рис. 125. Тепловой баланс шахтных печей (по Хирту)

1 — потеря тепла с отходящими газами; 2 — расход тепла на предварительную сушку; 3 — расход тепла на испарение воды (механически связанной); 4 — потеря тепла излучением; 5 — дегидратация глины; 6 — испарение гидратной воды; 7 — теплота горения топлива; 8 — тепло шамота, выходящего из печи; 9 — тепло воздуха, подаваемого в печь через охлаждаемый шамог (рекуперация тепла); 10 — тепло от сжигания топлива (газа); 11 — тепло (физическое) сжигаемого газа; 12 — потери при газификации топлива; 13 — тепло, отведенное для предварительной подсушки; 14 — подсос воздуха из атмосферы; 15 — потеря тепла утечкой газов в атмосферу; 16 — тепло, вносимое в печь с материалом; 17 — общее количество тепла в нагретом материале.

<sup>1</sup> А. Hirt „La Ceramique“, XI, 1930 (сообщение на Техническом конгрессе керамической промышленности 27/V 1930 г.)

По данным А. Хирта, расход энергии на вентиляторы и разгрузатели для печи с производительностью в 25 т в сутки, примерно, равен 11 кв. Процесс обжига глины и каолинов значительно сложнее обжига кварца и т. п. материалов, вследствие удаления из глины и каолинов механически и химически связанной влаги, а также слипания отдельных кусков материала в верхней части шахты. При обжиге отдельных видов глины, по мере их опускания к зоне обжига, выделяется большое количество водяных паров, насыщающих продукты сгорания газа и конденсирующихся на холодных кусках материала в верхней части шахты.

Влага, оседающая на поверхности глины, размягчает ее куски и приводит к их слипанию и образованию сводов (так называемых

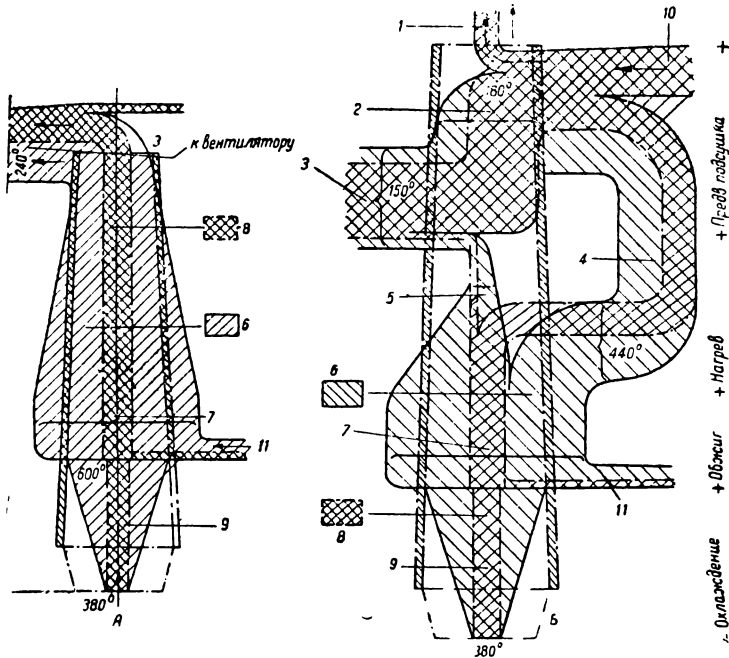


Рис. 126. Диаграммы газового потока

1 — выход воздуха; 2 — газ и воздух для предварительной подсушки; 3 — газ, воздух и пары, удаляемые вентилятором; 4 — газы, отведенные для предварительной сушки; 5 — газы, направляющиеся прямо вверх к вентилятору; 6 — объем газа, приведенный к температуре соответствующего участка печи; 7 — общее количество газов; 8 — объем газов, приведенный к температуре °С; 9 — воздух для горения, подогреваемый за счет охлаждения обожженного материала; 10 — подсос воздуха из атмосферы; 11 — газ из газогенератора.

„козлов“), препятствующих дальнейшему опусканию материала в шахте. В целях устранения этого явления и сохранения высокой производительности шахтных печей при обжиге слипающихся глины (например часов-ярских), в верхней части шахты предусматривается устройство для предварительной подсушки глины горячим воздухом или разбавленными топочными газами (шмаух-процесс).

Этот метод подсушивания приводит к образованию сухой корки на поверхности кусков глины и предохраняет их от слипания. На рис. 127 показаны две печи с разными устройствами для предварительной подсушки глины.

На рис. 127 А дана схема шахтной печи, в которой горячие продукты сгорания отбираются вентилятором 1 через трубу 2 из

зоны обжига и подаются по трубе 3 в верхнюю часть зоны подогрева. Здесь горячие газы с низкой влажностью под действием вентилятора 4 направляются через сырую глину и отбирают из нее влагу, благодаря чему на поверхности кусков образуется сухая корка. Температура дымовых газов, направляемых в зону предварительной сушки глины, регулируется путем разбавления их атмосферным воздухом, который засасывается вентилятором 1 через трубу 5. Регулируя количество подсосанного воздуха, можно менять температуру, количество и влагоемкость газовой смеси, подаваемой на подсушку глины.

На рис. 127 Б дана схема печи, в которой подсушка глины производится горячим воздухом, засасываемым вентилятором 6 через трубу 7 из зоны охлаждения шахтной печи. Температура воздуха, подаваемого в зону предварительной сушки, также регулируется путем смешения горячего воздуха с атмосферным, который засасывается вентилятором через трубу 8. Последний способ предварительной сушки глины (горячим воздухом из зоны охлаждения) принят в шахтных печах конструкции инж. Гросса (рис. 128).<sup>1</sup>

Для получения в шахтных печах продукции, отвечающей техническим условиям, и обеспечения высокой производительностью установок требуется соблюдение изложенных ниже условий.

Для выпуска стандартного материала необходимо обеспечить равномерный по всему сечению поток горячего воздуха от зоны охлаждения и достаточно глубокое проникновение газовых струй в загрузку шахты. Количество воздуха, проходящее от периферии к центру шахты, а следовательно, и условия горения газа резко меняются, в зависимости от плотности загрузки шахты материалом.

Круглое сечение шахты при наличии распределительной загрузочной воронки типа, применяемого в доменных печах, обеспечивает скатывание более крупных кусков материала к центру, большую рыхлость загрузки в центральной части шахты и тем самым улучшает циркуляцию газов и способствует выравниванию температур в центре загрузки, обычно имеющей в большинстве шахтных печей значительный недожог материала. Повышенное давление газового дутья способствует проникновению газа в толщу материала, в известной мере парализует вредное влияние неравномерной плотности загрузки шахты и является важнейшим средством для повышения производительности печей.

В печах, работающих на газовом отоплении, высокую производительность, равномерность обжига и высокий коэффициент полезного действия можно получить лишь при обеспечении хорошего смешения газа с горячим воздухом, поступающим в зоны охлаждения.

В этом направлении и прорабатываются новые конструкции шахтных печей, а также мероприятия по улучшению работы уже

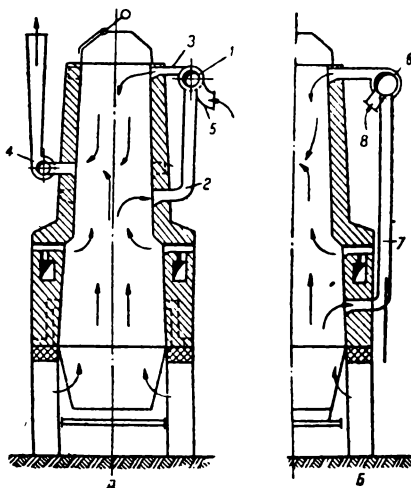


Рис. 127. Схема движения газов в шахтных печах для обжига шамота

<sup>1</sup> Г. О. Гросс. Обжиг шамота. ОНТИ, 1934.

действующих установок. Одним из наиболее радикальных мероприятий является повышение давления газового дутья, дающее выравнивание температуры по сечению шахты и увеличение производительности печей и требующее соответствующего уплотнения бункера, выгрузочного механизма и других деталей конструкции для предупреждения возможной утечки газа и горячего воздуха. Давление

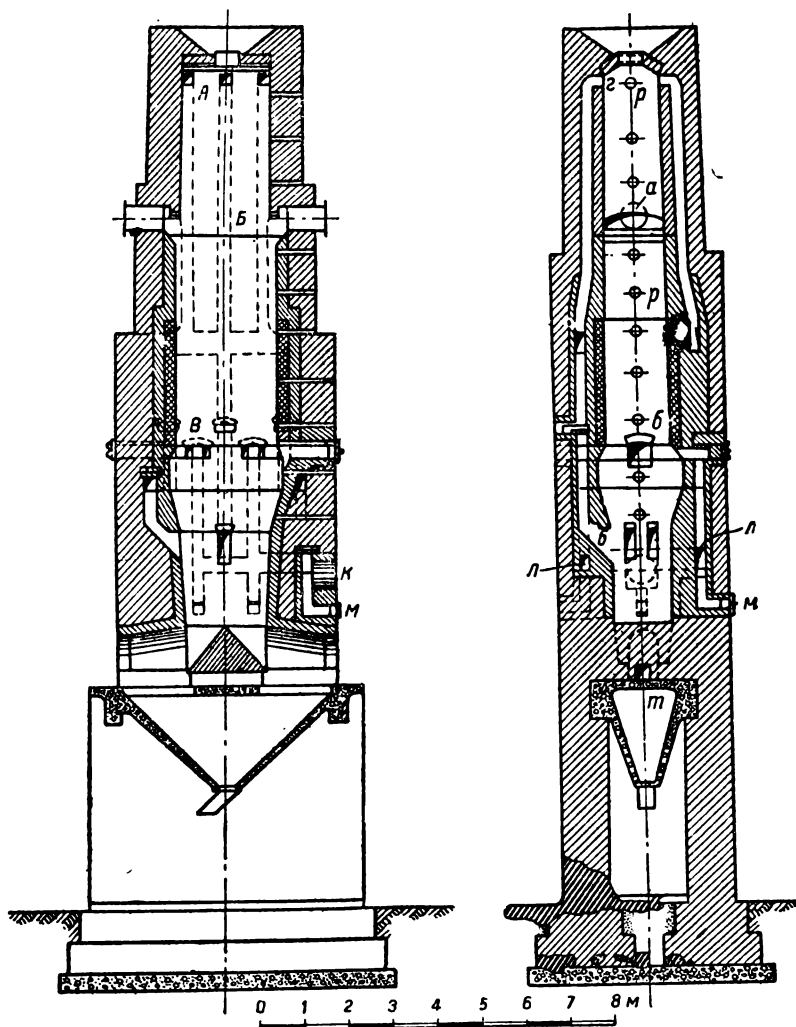


Рис. 128. Шахтная печь Гросса

газа около 700—800 мм вод. ст. при небольшом сечении (порядка 3 м<sup>2</sup>) шахты обеспечивает достаточное перемешивание его с воздухом и нормальный ход обжига. На рис. 129 показаны кривые обжига бобриковской глины с большим содержанием углерода и часовой-ярской.

Выбор системы отопления шахтных печей обусловлен техническими требованиями, предъявляемыми к выпускаемой продукции, свойствами используемого топлива и, отчасти, мощностью установок.

### III. Основные принципы устройства и работы туннельных печей

Туннельные печи появились в середине XIX века. Первый патент на туннельную печь был заявлен в 1840 г. Р. А. Йордом, а построена была первая такая печь в 1853 г.

К числу первых конструкций раннего периода относятся печи Раша, Сименс-Гессе, Борри и другие, не имевшие практического успеха из-за ряда технических недостатков (важнейший — плохая изоляция колес, букс и других металлических частей вагонеток от действия высоких температур, получаемых в канале зоны обжига).

Боку принадлежит заслуга устройства затвора у вагонетки для защиты от нагрева металлических ее частей. Первая туннельная печь Бока была построена в 1873 г. для обжига кирпича с отоплением по типу гофманских печей (топливо забрасывается через сводовые отверстия в шахты, оставленные для сжигания топлива в загрузке вагонеток).

Однако, вследствие небольшой длины и других конструктивных недостатков, первые печи, построенные для обжига кирпича, не получили распространения.

Возможно, что препятствием к внедрению первых туннельных печей послужило развитие в то время кольцевых гофманских печей, более простых по конструкции и не требовавших механических устройств, что, в условиях кустарной техники керамических производств того времени, являлось крупным преимуществом.

Устойчивая и надежная работа этого типа печей началась с постройки французской фирмой Фужерон туннельной печи с топками, расположенными с обеих сторон зоны обжига.

В 1906 г. фирма Тильш построила в Германии две туннельные печи длиной в 40 м и в 60 м, по типу печей Фужерона для обжига фарфоровой посуды.

В России первые туннельные печи были построены в 1911 г. на фарфоро-фаянсовых фабриках Кузнецова (две печи на Тверской фабрике и одна — на Будянской) и на Хмелевском фарфоровом заводе (одна печь).

Основными частями туннельной печи являются: печной канал и передвигающиеся в нем вагонетки (на которые нагружаются изделия, подлежащие обжигу), топочные, тяговые и нагнетательные устройства для получения высоких температур и создания циркуляции печных газов, а также механизмы для перемещения вагонеток

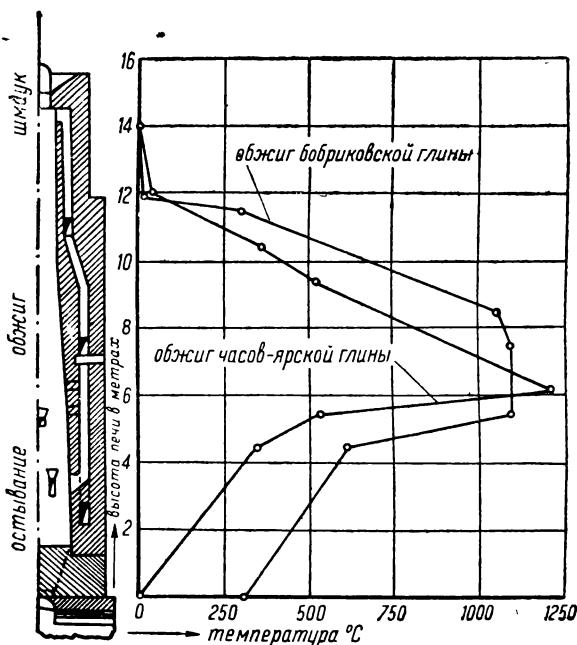


Рис. 129. Сравнительная диаграмма обжига часов-ярских и бобриковских глин

и для других операций по управлению обжигом. Работа туннельных печей производится по принципу противотока: вагонетки с обжигаемой продукцией постепенно передвигаются через канал печи навстречу потоку сначала обогревающих, а потом охлаждающих печных газов. Поэтому работа туннельных печей определяется как свойствами печных газов, их составом, температурой, так и скоростями движения газов и вагонеток. При чрезвычайно большом разнообразии методов работы и конструкций туннельных печей, имеется все же несколько типичных схем движения печных газов, охваты-

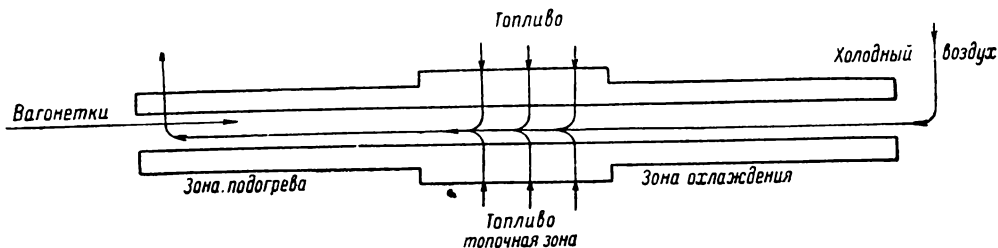


Рис. 130. Схемы работы туннельной печи

вающих большинство работающих и запроектированных печей. Наиболее простая схема, положенная в основу работы первых туннельных печей, показана на рис. 130.

Воздух, подающийся в конец туннеля, проходит мимо поезда охлаждающихся вагонеток и весьма нагретый поступает в зону обжига, где частично используется на горение топлива, подаваемого через сводовые отверстия (печи типа печей Боха, Мещерякова) или через боковые топки в виде топочных газов с незаконченным горением. Топочные газы в зоне обжига заканчивают нагрев вагонеток, поступающих из зоны подогрева, проходят через загрузку

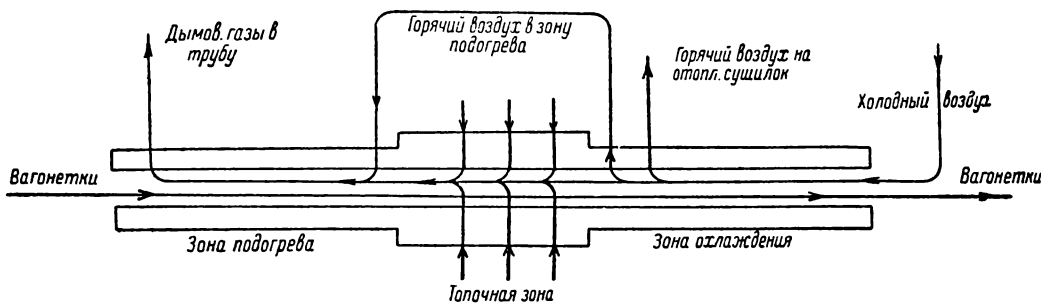


Рис. 131. Схема туннельной печи с отбором горячего воздуха из зоны охлаждения

вагонеток, постепенно подогревают изделия и через приемные борта, расположенные у входной части туннеля, и дымовую трубу удаляются в атмосферу.

Как в первом варианте, так и в особенности во втором, когда часть воздуха на горение поступает непосредственно из атмосферы, количество воздуха, подаваемое в зону охлаждения и необходимое для достаточно быстрого охлаждения, не может быть полностью использовано на горение топлива. Поэтому в более современных конструкциях предусматривается отбор горячего воздуха из зоны охлаждения на производство (для обогрева сушилок и помещений) или для досушки изделий на первых вагонетках, по схеме (рис. 131),



что достигается путем обвода воздуха мимо зон обжига в начальную часть зоны подогрева.

Использование горячего воздуха в зоне подогрева применяется, как и в гофманских печах (шмаух-процесс), в тех случаях, когда подсушка влажных изделий отработанными газами привела бы к выделению влаги на холодных изделиях (конденсация). Кроме того, этот метод позволяет утилизировать тепло избыточного горячего воздуха в самой печи и облегчает получение в зоне обжига восстановительной атмосферы, необходимой при обжиге ряда изделий (фарфоровая посуда, клинкер). В некоторых печах может иметь место одновременный отбор избыточного воздуха (горячего) как в цехе, так и на шмаух-процессе.

Для обеспечения нормального технологического процесса, обжиг в любой печи должен производиться в соответствии с установленным оптимальным режимом, т. е. по заданным кривым температуры и газовой среды. Повышение температуры в зоне подогрева зависит от температуры и количества печных газов, протекающих по каналу, плотности загрузки вагонеток, скорости движения газов и условий передачи тепла от горячих газов к обогреваемым изделиям. В зависимости от этих взаимно между собой связанных фактов получается естественная для данных условий кривая повышения температуры нагреваемых изделий. Довольно часто получаемый естественный подъем кривой в отдельных стадиях не соответствует заданному режиму обжига.

Охлаждение изделий встречным потоком холодного, постепенно нагревающегося воздуха протекает также по кривой, конфигурация которой обусловлена, в основном, законами теплопередачи и скоростями воздуха, омывающего продукцию, и также часто не соответствует оптимальной кривой быстрого и безопасного охлаждения.

Скорость нагрева возрастает при температурах выше  $500-600^{\circ}\text{C}$ , когда повышается теплоотдача излучением, и вновь уменьшается при достижении предельных температур обжига, при которых разница между температурами топочных газов и нагреваемых изделий уменьшается и вместе с ней ухудшается теплопередача.

Охлаждение изделий также проходит наиболее интенсивно на участке с температурами выше  $500^{\circ}\text{C}$ , где происходит быстрая отдача тепла лучеиспусканием. Кривая нагрева и охлаждения, обусловленная работой потока газов, протекающих по всем сечениям канала, имеет крутые подъем и падение на участках высоких температур и более пологое направление в начале зоны подогрева и в конце зоны охлаждения.

Регулирование подъема температурной кривой в зоне обжига легко достигается соответственным размещением топок (горелок) и характером работы последних (большая или меньшая форсировка). Если требуется изменить естественную кривую обжига и охлаждения, приведенную в виде примера на рис. 132, в сторону более быстрого повышения температур в конце обжига или расширения зоны высоких температур, то для этого достаточно при постройке печи поставить дополнительные горелки в конце зоны подогрева.

Иногда необходимо задержать повышение температуры в начальной или средней части зоны подогрева, например, при обжиге крупных шамотных камней, требующих постепенного и осторожного удаления гигроскопической и гидратной воды. В этом случае замедление нагрева может быть получено за счет сокращения мощности теплового потока на этих участках зоны подогрева путем предваритель-

ного (промежуточного) отбора части горячих газов перед участком, где требуется замедление повышения температуры.

На рис. 132 рядом с кривой повышения температур 1, получающейся при короткой зоне обжига и отборе отработанных газов у входной части туннеля, показана пунктирная кривая 2 с пологим подъемом в начале обжига вследствие промежуточного отбора части дымовых газов в точке В и с более крутым подъемом в конце зоны подогрева и удлинненным периодом высоких температур вследствие устройства широкой зоны обжига с несколькими топками. Благодаря подаче горячих газов в среднюю часть зоны подогрева и устройству здесь дополнительных топок, можно получить более ровное повышение температуры на протяжении всего периода обжига (кривая 3).

Для изменения отмеченного выше характера кривой охлаждения, получаемой при охлаждении вагонеток встречным потоком воздуха, применяется как дополнительная подача воздуха в разных точках зоны охлаждения, так и промежуточный отбор части воздуха охлаждающего вагонетки.

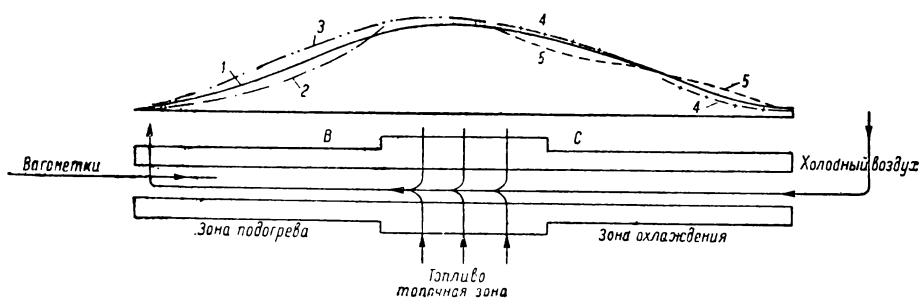


Рис. 132. Изменение режима обжига в зависимости от конструкции туннельной печи

При отборе части воздуха в точке С уменьшается его поступление на охлаждение расположенных дальше более горячих вагонеток и замедляется их охлаждение — кривая температур между зоной обжига и точкой С подымается. Форсируя отбор воздуха в точке С, можно получить больший обмен воздуха и более резкое остывание вагонеток в выходной части туннеля, начиная от места промежуточного отбора воздуха (кривая 4 на рис. 132).

Наоборот, при подаче в точке С дополнительного холодного воздуха получается большая скорость охлаждения на участке высоких температур и медленное охлаждение в части зоны охлаждения между точкой С и концом туннеля (кривая 5). Комбинируя размещение точек подвода холодного воздуха в зону охлаждения и отбора подогретого, а также количества и скорости воздуха, можно получить различные режимы охлаждения в соответствии с технологическими требованиями.

Изложенное выше показывает, что туннельная печь имеет весьма широкие возможности для регулирования температурной кривой обжига и охлаждения, в соответствии с заданием. Необходимо, однако, отметить, что чем сложнее принципиальная схема и конструкция печи, тем, естественно, труднее регулировка и обслуживание.

Поэтому сложные конструкции туннельных печей применяются, как правило, лишь для обжига продукции, требующей весьма строгого

режима обжига, невыполнимого более простыми способами. Ряд мероприятий, осуществляемых в сложных печах, например, промежуточный отбор отработанных газов в зоне подогрева и горячего воздуха в зоне охлаждения, понижают коэффициент топливоиспользования в пределах самой туннельной печи и потому не всегда выгодны, так как улучшение режима обжига получается за счет некоторого снижения коэффициента полезного действия установки.

Установление нормального режима давлений в производственных условиях в разных пунктах туннеля, построенного по сложной схеме, представляет трудную задачу, требующую высокой квалификации технического персонала как в период проектирования, постройки и пуска, так и во время регулярной эксплуатации.

Этими обстоятельствами и недостатком опыта в области проектирования и эксплуатации туннельных печей, которые работают на обжиге изделий, требующих резко очерченных режимов, объясняется живучесть периодических печей, весьма неэкономных в отношении расходов на топливо и содержания обслуживающего персонала. Эти печи пока еще продолжают работать на некоторых вполне современно оборудованных керамических заводах. Однако туннельные печи простых конструкций в силу своих производственно-экономических преимуществ успешно вытесняют на крупных заводах печи других типов.

---

## ГЛАВА ВОСЬМАЯ

### ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ БОЛЬШОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

По способу нагревания обжигаемых изделий различают туннельные печи прямого действия и муфельные. В печах прямого действия топочные газы непосредственно омывают изделия или загруженные ими капсулы; в туннелях муфельного типа тепло топочных газов передается изделиям через стенки муфельных каналов путем лучеиспускания и конвекцией раскаленного воздуха, циркулирующего в печном канале.

Особую группу составляют туннельные печи, в которых нагрев производится электрическим током.

В настоящее время имеется, главным образом, в Европе и США, много разных конструкций туннельных печей.

В дальнейшем будут кратко описаны наиболее распространенные в СССР и за границей типы и конструкции туннельных печей.

#### 1. Печи системы Фужерона

Первые туннельные печи, построенные в России (в 1911 г.), — печи Фужерона. Две из них работают и в настоящее время на заводе им. Калинина и одна — на Будянском заводе (под Харьковом).

Вначале все три печи имели совершенно одинаковую конструкцию. В последние годы топочная зона туннеля Будянского завода переделана на нефтяное отопление, а в одном из туннелей Калининского завода, взамен обычных топок, устроены полугазовые топки системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло.

В этой печи длина туннелей 65 м, ширина канала 1,3 м, высота от пода платформы до замка свода 1,65 м. Длина зоны подогрева (округленно) 27 м, зоны обжига (топочной) 7 м, зоны охлаждения 31 м.

На рис. 133 слева показан разрез через топочную зону туннеля в его первоначальной конструкции, а справа — после устройства полугазовых топок, подробно описанных в разделе топочных устройств. Оба туннеля могут работать как на дровах, так и на торфе. В топках с колосниковой решеткой в кладке устроены каналы для подачи

вторичного воздуха из контрольного хода под вагонетками в топочный вылет.<sup>1</sup>

Пламя из топок попадает в горизонтальный канал, расположенный в кладке стены туннеля параллельно его оси. Из горизонтального канала топочные газы через ряд вылетов попадают в каналы, образующиеся на полу вагонетки между шамотовыми подставками, и, омывая столбы капселей, поднимаются под свод печного канала. Основной идеей конструкции туннеля Фужерона является устройство поднимающихся и опускающихся сводов в канале туннеля и боковых обходных каналов для отвода газа из-под капсельной загрузки вагонетки и подвода их снизу к следующей группе вагонеток (рис. 134).

Топочные газы, по замыслу автора конструкции, должны подняться между столбами капселей, пройти под приподнятым сводом туннеля до опускающегося свода, опуститься через каналы, между капселями к полу вагонетки, пройти через боковые каналы к следующей группе вагонеток и опять попасть под столбы капселей.

Дальше горячие газы должны опять подняться под свод туннеля, пройти под сводом до заграждающей путь низкой арки, опуститься вниз через каналы в загрузке вагонетки и т. д. Этот цикл, при указанной выше длине зоны подогрева, повторяется три раза. Прохождение топочных газов несколько раз сверху вниз через загрузку вагонеток должно обеспечивать равномерный обжиг продукции по высоте.

Необходимо отметить один довольно существенный недостаток туннельных печей — неизбежное расслоение печных газов при горизонтальном их движении по каналу туннеля. Более горячие газы всегда проходят под сводом, а охлажденные — более тяжелые — омывают нижние ряды капселей.

Этот недочет усугубляется более или менее значительным засосом холодного воздуха из-под поезда вагонеток через песочный затвор и уплотнение между вагонетками, что, в результате, приводит к большой разнице температур по высоте вагонетки в зоне подогрева (рис. 135).

Стремление прижать горячие газы к полу или обеспечить зигзагообразную циркуляцию топочных газов между загрузкой вагонеток является основной целью всех конструкций туннельных печей.

Для практического осуществления основной идеи конструкции туннеля Фужерона необходимо соблюдение следующих условий:

1) возможно полное заграждение проходов для продольного движения печных газов в канале туннеля под низкими сводами;

2) большое разрежение у входной части туннеля, достаточное для преодоления всех сопротивлений в каналах между капселями, на поворотах и в каналах, заложенных в боковых стенах;

3) вполне герметическое уплотнение вагонеток, предотвращающее засос воздуха снизу.

Практически не удается обеспечить полное заграждение пути для продольного движения газов в тех местах, где они должны повернуть в боковые каналы, и газы через щели между загрузкой вагонеток, боковыми стенами и сводом идут прямо — по линии наименьшего сопротивления.

---

<sup>1</sup> Полугазовые топки туннельной печи сходны по устройству с полугазовыми топками, описанными в главе третьей.

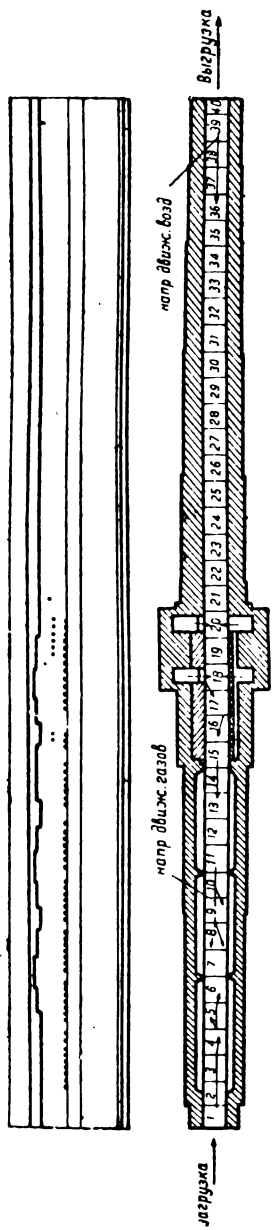


Рис. 134. Туннельная печь системы Фужерона

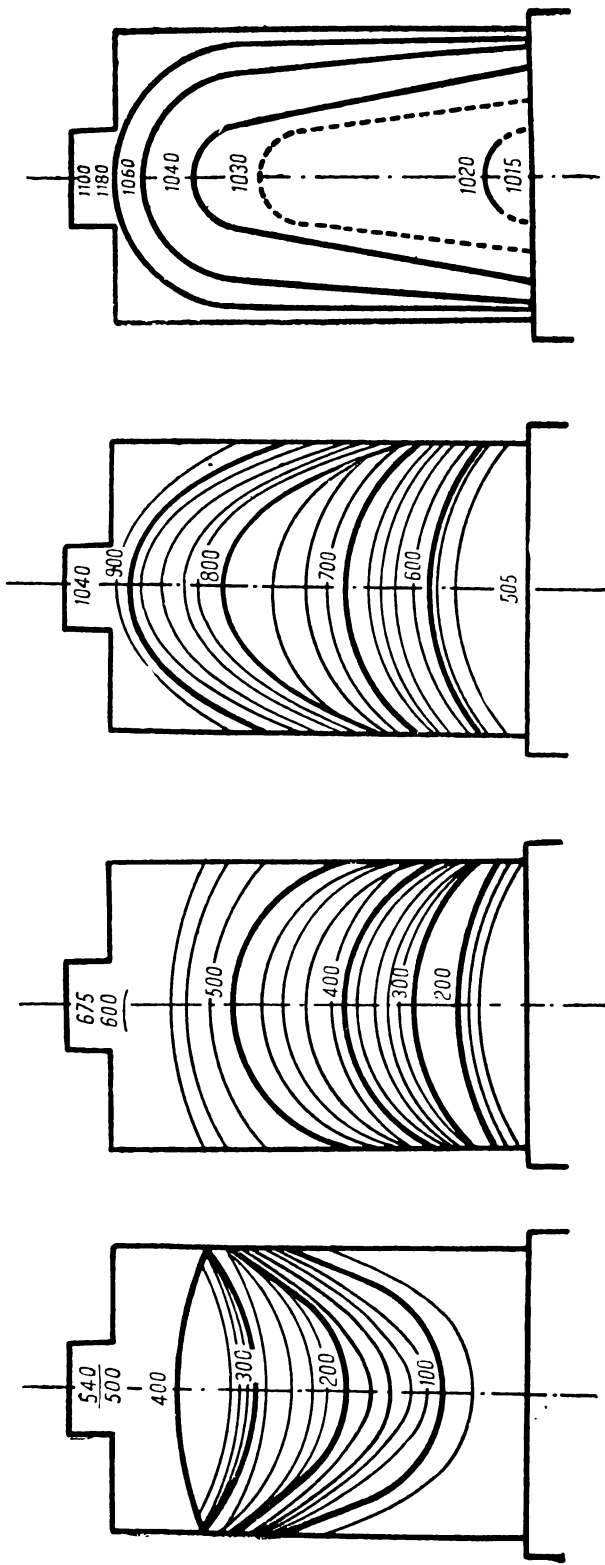


Рис. 135. Изотермы по сечению загрузки вагонок в зоне подогрева

Сопротивление, возникающее на пути намеченного в конструкции печи зигзагообразного движения печных газов, достаточно велико, и при обеспечении плотных заграждений для прямолинейного движения газов потребовалось бы значительное разрежение для преодоления этих сопротивлений.

Высокое разрежение повлекло бы, в свою очередь, увеличение засосов через щели между вагонетками и песочные затворы.

Таким образом, намеченная конструкцией схема движения печных газов в зоне подогрева практически не выдерживается.

Контрольные замеры в туннелях показывают, что подавляющая масса печных газов движется по прямому пути, не заходя в боковые каналы. Этот разрыв между проектной схемой циркуляции печных газов и ее практическим осуществлением в печах системы Фужерона не дает столь большой разницы конечных температур обжига для нижних и верхних рядов капсулей, так как при небольшом сечении туннелей температура на вагонетке успевает частично выравниваться во время ее пребывания в топочной зоне, где в нижнюю часть загрузки вагонеток подаются наиболее горячие (см. рис. 134, позиция 18) топочные газы. Кривые одинаковых температур (изотермы) по сечению вагонетки показывают уменьшение разницы температур от  $425^{\circ}\text{C}$ , примерно, до  $65^{\circ}\text{C}$ . Направление изотерм также ясно указывает отставание нагрева средних капсулей относительно боковых в начале подогрева и обратную картину по мере приближения к зоне обжига. Однако, при форсировании работы туннельных печей и сокращении времени пребывания изделий в зоне обжига, эта разница будет более ощутительной и в некоторых случаях может оказаться лимитирующей производительность печей (рис. 136 и 137).

Зона охлаждения в туннелях Фужерона по конструкции сходна с зоной подогрева. Холодный воздух, входящий в туннель, так же как и топочные газы, должен проходить извилистый путь. Так как в этой части туннеля разрежение значительно ниже, чем в зоне

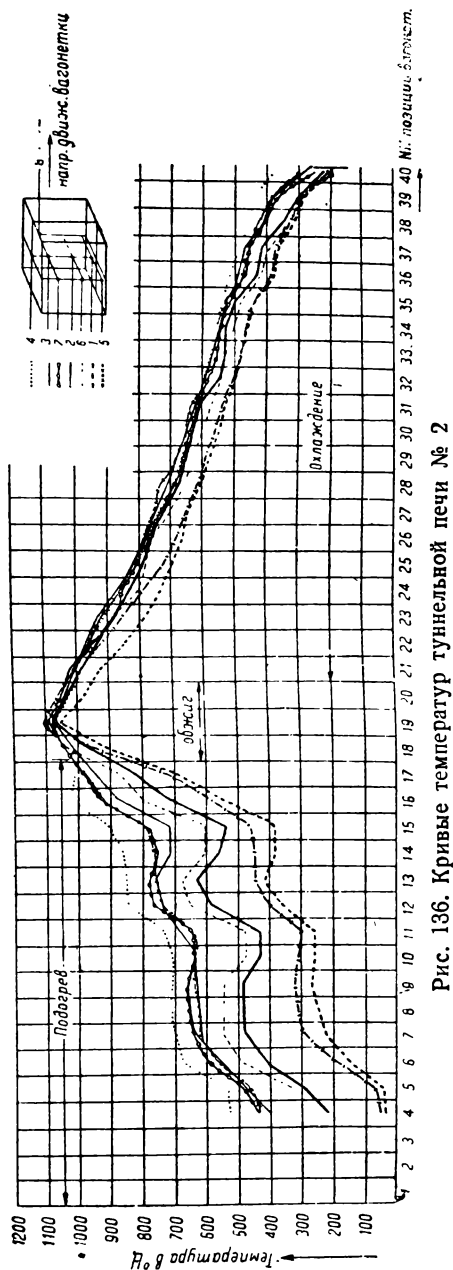


Рис. 136. Кривые температур туннельной печи № 2

подогрева, и все остальные противодействующие условия остаются не устраненными, то и здесь воздух движется по прямому пути со

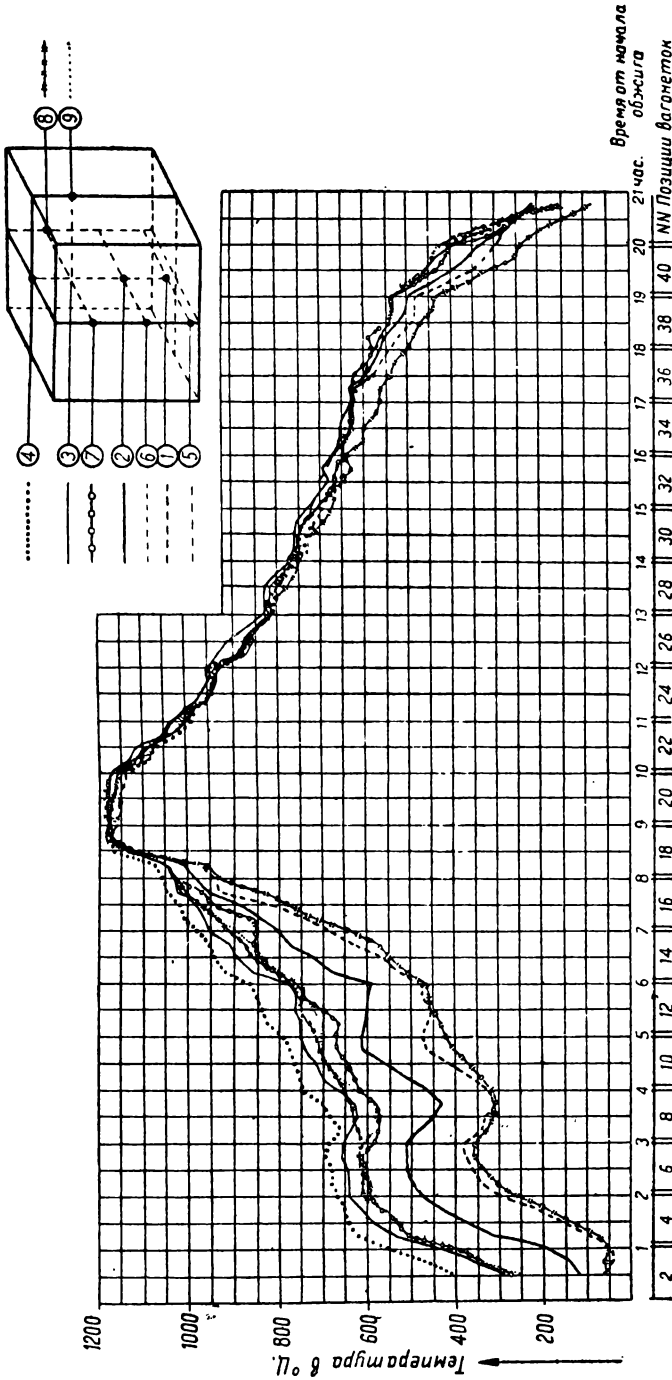


Рис. 137. Кривые температур туннельной печи № 1

всеми признаками расслоения: сверху — нагретый, внизу — более холодный. Охлаждение в печах Фужерона также является слабым местом конструкции.



Принципиально намеченная в этих печах схема движения топочных газов и охлаждающего воздуха поочередно вверх и вниз через вертикальные каналы, с точки зрения гидравлической теории, является необоснованной, так как наиболее удачное распределение между капсулями горячих охлаждающихся газов получается лишь при нисходящих потоках, а для холодных и нагревающихся газов — при восходящих. Здесь же и при нагревании и при охлаждении должно быть попеременно то восходящее, то нисходящее движение. Однако, практически газы движутся, главным образом, по оси туннеля и влияние вертикальных составляющих гидростатического напора при малом сечении туннеля и невысоких каналах между столбами капсул столь ничтожно, что эти соображения могут иметь лишь теоретический интерес.

Средняя производительность туннеля Калининского завода при обжиге фаянса — около двух с половиной вагонеток в час, что при ассортименте с преобладанием тарелок составляет, примерно, 20 т фаянсовой посуды в сутки.

Оба туннеля Калининского завода обслуживаются общей дымовой трубой, что представляет известные неудобства при регулировании работы печей.

#### КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ СИСТЕМЫ ФУЖЕРОНА <sup>1</sup>

1. Количество вагонеток в туннеле . . . . .	40 шт.
2. Длина вагонетки . . . . .	1,62 м
3. Объем садки вагонетки (в среднем) около . . . . .	2,7 м <sup>3</sup>
4. Зазор между капсулями и стенами туннеля . . . . .	85 мм
5. Количество топок у каждой печи . . . . .	4 шт.

##### 6. Размеры топок:

##### Печь № 1 (с простыми топками)

длина топки . . . . .	1 400 мм
ширина топки . . . . .	620 "
высота . . . . .	1 100 "
объем . . . . .	0,95 м <sup>3</sup>
площадь колосниковой решетки . . . . .	0,87 м <sup>2</sup>
высота зольника . . . . .	440 мм

##### Печь № 2 (с полугазовыми топками)

длина топки . . . . .	1 540 "
ширина топки . . . . .	1 000 "
высота шахты от подошвы до свода . . . . .	1 600 "
сечение оверстия для чистки золы . . . . .	300×700 "

7. Сечение боковых каналов для отвода дымовых газов . . . . .	350×380 "
8. Ширина и высота (до пят свода) дымового борова . . . . .	650 "
9. Диаметр дымовой трубы (для двух печей) в устье . . . . .	1 400 "
10. Высота трубы . . . . .	55,5 м

	Печь № 1 (с простыми топками)	Печь № 2 (с полугазо- выми топками)
--	-------------------------------------	---

11. Вес загрузки вагонетки общий (политой фаянс + + капсули) в кг . . . . .	1 239	1 285
12. В том числе фаянс в кг . . . . .	297	310
13. Вес загрузки на 1 м <sup>3</sup> садки вагонетки (капсули + + фаянс) в кг . . . . .	464	482
14. В том числе фаянс в кг . . . . .	111	116

<sup>1</sup> По результатам обследования туннельных печей системы Фужерона, проведенного ГИКИ на заводе им. Калинина 18, 19, 28, 29 ноября 1934 г.

	Печь № 1 (с простыми топками)	Печь № 2 (с полугазо- выми топками)
15. Часовая производительность в колич. вагонеток . . .	1,84	1,95
16. " " " кубат. садки в м <sup>3</sup> . . .	4,91	5,21
17. " " " весе (капсели + фаянс) в кг . . . . .	2 279	2 504
18. Часовой выпуск фаянса (ассортимент с преоблада- нием тарелок) в кг . . . . .	547	604
19. Конечная температура обжигаемого фаянса в °С . . .	1 170	1 090
20. Состав уходящих дымовых газов: содержание углекислоты в % . . . . .	6,30	5,9
" кислорода " " . . . . .	14,30	15,00
21. Температура уходящих газов в °С . . . . .	290	260
22. Разрежение в главном борове в мм вод. ст. . . . .	15,3—18,5	12,4—17,8
23. Расход топлива в 1 час (дрова разных пород с влаж- ностью в 24—28%) в кг . . . . .	616	562
24. Удельный расход натурального топлива на 1 м <sup>3</sup> садки вагонетки в кг/м <sup>3</sup> . . . . .	125,3	108
25. Удельный расход натурального топлива 1 кг общей загрузки вагонетки (капсели + фаянс) в кг/кг . . . . .	0,270	0,224
26. Удельный расход условного топлива на 1 кг загрузки вагонетки (капсели + фаянс) в кг/кг . . . . .	0,12	0,10
27. Удельный расход условного топлива на 1 кг фаянса в кг/кг . . . . .	0,50	0,41

Туннельная печь, построенная на Будянском заводе, по конструкции не отличалась от печи завода им. Калинина. В 1926 г. печь Будянского завода была реконструирована инж. Гельманом для работы на мазуте с соответствующим переустройством топочной зоны. Зона подогрева и зона охлаждения остались без перемен, и конструктивные изменения коснулись лишь зоны обжига и вспомогательных при ней устройств.

С каждой стороны топочной зоны туннеля работают по две мазутных выносных топки с общими камерами смешения. Насосами системы Вортингтон через фильтры, подогреватели, компенсаторы мазут с температурой 70—80° (для более совершенного распыления) подается к механическим форсункам „Атом“. Кроме того, в каждой топке имеется по одной запасной форсунке. Выходное отверстие форсунки равно 1 мм. Воздух для сжигания мазута подается в разных направлениях для лучшего перемешивания с распыленным мазутом. В смесительной камере происходит неполное сгорание мазута; горение заканчивается в печном пространстве за счет воздуха, поступающего из зоны охлаждения. Часть вторичного воздуха поступает в топочную зону непосредственно из помещения через каналы, заложенные в кладке топок, что, помимо подогрева вторичного воздуха, охлаждает кладку топки и способствует более продолжительной ее службе. Топки работают с неодинаковым напряжением: в топке, расположенной ближе к зоне подогрева, сгорает в 1 час около 75 кг мазута, а в расположенной ближе к зоне охлаждения сжигается, в среднем, 50 кг.

Из каждой камеры смешения пламя подается в печной канал через вылеты, расположенные на уровне шамотных подставок (просфир), размером 20×21 см, а также и через второй ряд вылетов, размерами 12×13 см, расположенных на уровне четвертого ряда коробов (капселей). Факел пламени из нижних вылетов захватывает 2½ вагонетки, а из верхних — 1½ вагонетки. Топочные газы из зоны обжига проходят через зону подогрева в боров и отдают тепло обжигаемым изделиям, охлаждаясь до температуры в 250—300° С.

Помимо полезной теплопередачи, на снижение температуры отходящих газов оказывает большое влияние примешивание к ним в зоне подогрева больших количеств воздуха из-под вагонеток.

В зоне охлаждения фаянса охлаждается до температуры в 400—500°С путем омыwania непосредственно потоком воздуха, засасываемого из помещения цеха через каналы в боковых стенах туннеля. Воздух подогревается, по мере продвижения к зоне обжига, до 600—700°С и поступает частично на сжигание топлива, а остальное количество отсасывается для сушки заформованных изделий. Для характеристики работы печи Фужерона на мазуте, ниже приводятся данные теплотехнического испытания, проведенного 8 сентября 1927 г.

- |  |                      |
|--|----------------------|
| 1. Производительность в сутки . . . . .  | 53 396 шт., 12,594 т |
| 2. За сутки через туннель прошло вспомогательной загрузки (капселей, крышек и т. п.) . . . . .                             | 44 395 кг            |
| 3. Отношение вспомогательной загрузки к весу изделий (отношение в круглых горнах 3,72) $\frac{44\ 395}{12\ 894}$ . . . . . | 3,44 кг/кг           |
| 4. Продолжительность обжига (примерно в 2,4 раза короче продолжительности обжига в круглом горне) . . . . .                | 8,73 час.            |
| 5. Средняя температура обжига в пределах . . . . .   | 1 170—1 220 °С       |
| 6. Расход грозненского мазута с теплотворной способностью 10 000 кал/кг — в сутки . . . . .                                | 3 678 кг             |
| 7. Удельный расход мазута на 1 кг обожженного фаянса (при удельном расходе в круглых горнах около 0,924 кг/кг) . . . . .   | 0,285 кг             |
| 8. Удельный расход мазута на 1 кг суммарной загрузки вагонетки (фаянс, капсули) . . . . .                                  | 0,064 „              |
| 9. Расход условного топлива на 1 кг обожженного фаянса . . . . .   | 0,434 „              |
| 10. Давление мазута у форсунок . . . . .   | 5,5 ат               |
| 11. Разрежение в канале печи:  |                      |
| в топочной зоне . . . . .  | 1 мм вод. ст.        |
| в борове . . . . .   | 12 „ „ „             |
| 12. Средний состав газов (в топочной зоне по ряду анализов) в %:   |                      |

CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>
10,6	1,7	3,5	0,8	1,2

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 13. Избыток воздуха по анализу продуктов горения в борове (при содержании CO — 0,47%) . . . . . | $\alpha = 3,35$ |
| 14. Расход воздуха на сжигание мазута и подсос из вагонеток в зоне подогрева . . . . .          | 74,4 кг/час     |
| 15. Расход воздуха на охлаждение вагонеток в зоне охлаждения . . . . .                          | 1 345 „         |

### Тепловой баланс

#### Расход

##### 1. Расход тепла на обжиг фаянса за 24 часа:

- |  |               |
|--|---------------|
| а) теплосодержание фаянса . . . . .            | 3 046 200 кал |
| б) на удаление влаги из посуды . . . . .       | 577 400 „     |
| в) скрытая теплота плавления глазури . . . . . | 59 300 „      |

Всего . . . . . 3 682 900 кал — 9,4%

II. Расход тепла на нагревание вспомогательной загрузки вагонеток (капселей, крышек) . . . . .	12 293 800 кал—31,3%
III. Расход тепла на нагрев воздуха в междусудовом пространстве (с последующим его использованием в производстве) . . . . .	1 645 000 кал—4,2%
IV. Тепловые потери с отходящими газами . . . . .	10 772 900 " —27,3%
V. Потери от неполного сгорания . . . . .	1 655 100 " —4,2%
VI. Потеря на лучеиспускание в окружающую среду и остальные неучтенные потери определяются по разности (остаточный член) . . . . .	9 201 900 " —23,6%
<hr/>	
Всего . . . . .	39 251 600 кал—100%

### Приход

Теплотворная способность мазута, сжигаемого в сутки . . . . . 39 251 600 кал—100%  
Технический коэффициент полезного действия печи, с учетом использования горячего воздуха междусудового пространства (статья III), равняется:

$$K_T = \frac{9,4 + 31,3 + 4,2}{100} = 0,449.$$

Технический коэффициент полезного действия, без учета использования воздуха:

$$K_T = \frac{9,4 + 31,3}{100} = 0,407.$$

Экономический коэффициент полезного действия:

$$K_{\text{Э}} = \frac{9,4}{100} = 0,094.$$

Сопоставляя удельный расход условного топлива на 1 кг обожженного фаянса для туннельной печи завода им. Калинина, работающей на твердом топливе и полугазовых топках (0,41 кг/кг), с расходом условного топлива в такой же печи Будянского завода, работающей на мазутных топках при более высокой температуре обжига (0,434 кг/кг), приходим к следующему заключению.

При сходных конструкциях печей, одинаковых ассортиментах и плотности загрузки на 1 м<sup>3</sup> печи, расход топлива при нормальной эксплуатации печи в условных единицах мало зависит от вида топлива и конструкции топок, так как в канале туннельной печи имеются прекрасные условия для дожигания топлива, попадающего в раскаленную решетку из капселей.

Несравненно большее влияние на качество обжигаемых изделий и устойчивость капселей и печной кладки, как в круглых, так и в туннельных печах, имеют свойства топлива и конструкция топок.

Свойства топлива (влажность, зольность, пирометрический эффект горения) и конструктивные особенности топок в совокупности должны обусловить равномерный нагрев продукции в наиболее опасных местах вблизи топок и обеспечить заданный состав газовой среды.

Ряд более сложных вопросов регулирования режима обжига и охлаждения в более рельефной форме обрисовывается в нижеописанных туннельных печах с большой длиной канала, где работа зон подогрева и охлаждения имеет большее влияние на количество и качество выпускаемой продукции.

## II. Печи системы Емельянова

Первые в СССР туннельные печи для обжига фарфора были спроектированы и построены инж. Емельяновым на Хайтинском заводе Сибфарфора под Иркутском.

Новый Хайтинский завод был начат постройкой в 1924/25 г. Первая туннельная печь была пущена в эксплуатацию в 1927 г., а вторая — в 1929 г.

Печи системы Емельянова просты по конструкции и потому их постройка была проведена местными силами и средствами, при относительно небольших затратах.

К сожалению, печи Хайтинского завода не укомплектованы в достаточной мере контрольно-измерительной аппаратурой, а потому не представляется возможным в настоящее время дать исчерпывающую характеристику работы этих печей.

По имеющимся материалам,<sup>1</sup> конструкция и работа этих туннельных печей характеризуется следующими данными.

Туннельная печь № 1 имеет в длину 78,14 м и вмещает 46 вагонеток и одну дополнительную вагонетку. Последняя вводится в загрузочную камеру уже в период передвижения вагонеток. В загрузочной камере перед шибером помещаются 2 вагонетки, в зоне подогрева — 18, в зоне обжига — 3, в зоне охлаждения — 23.

Туннельная печь № 2 имеет в длину 81,8 м и вмещает 48 вагонеток и одну, вводимую в вестибюль туннеля при передвижении поезда. В этой печи перед входным шибером помещается 1 вагонетка, в зоне подогрева — 20, в зоне обжига — 3, в зоне охлаждения — 24.

Длина вагонеток 1,65 м (с уплотнением металлической части); ширина ставки на вагонетке — 1,44 м; высота ставки — 1,33 м. Используемая для загрузки кубатура вагонетки — 2,9 м<sup>3</sup>.

Обе печи работают на дровяном газе, который получают от центральной газогенераторной станции. В конструкции обеих печей есть много общего; однако, имеются различия в устройстве зон обжига и каналов для отвода горячего воздуха и подвода газа к горелкам.

На рис. 138 показан план и разрезы туннельной печи № 2. Как видно из плана, вагонетки подаются через боковые двери в загрузочную камеру, отделяемую железным подъемным шибером от помещения цеха и вторым таким же шибером от зоны подогрева. В загрузочной камере (вестибюль туннеля) помещаются две вагонетки: одна всегда стоит перед вторым шибером, а вторая в период нагрузки туннеля с помощью ручной передаточной тележки (трансферкара) подается с запасного пути в переднюю часть камеры (рис. 139).

После загрузки в камеру второй вагонетки с помощью ручных лебедок поднимаются шибера, отделяющие загрузочную камеру и зону охлаждения от зоны подогрева и обжига, и начинается проталкивание поезда вагонеток в канале туннеля на длину одной вагонетки, т. е. на 1,65 м.

---

<sup>1</sup> Н. А. Емельянов. Построение теплового баланса новой фабрики Сибфарфор. „Керамика и стекло“, № 4, 1929. — И. Ф. Пономарев. Работа туннельной печи для обжига фарфора на Хайтинской фабрике Сибфарфор. „Керамика и стекло“, № 9, 1929. — Материалы обследования Хайтинской фабрики комиссией Росфарфора в составе инж. И. А. Булавина и инж. А. С. Неофитова в июле 1932 г.

Передвижение вагонеток в канале туннеля осуществляется винтовым механическим толкателем весьма простой конструкции. Два толкающих штока с чугунной плитой видны на рис. 139. К плите толкателя прикреплен вертикальный железный щит, имеющий контуры канала туннеля и перекрывающий вагонетку с торцевой стороны. Проталкивание вагонетки показано на рис. 139 при поднятом боковом шибере; в нормальном рабочем положении боковой шибера должен быть опущен и закрывать вагонетку со стороны входной двери. В этом положении канал туннеля с входной стороны в период продвижения вагонеток закрыт с торцевой стороны щитом толкателя, а со стороны боковой двери — спущенным шиберам последней.

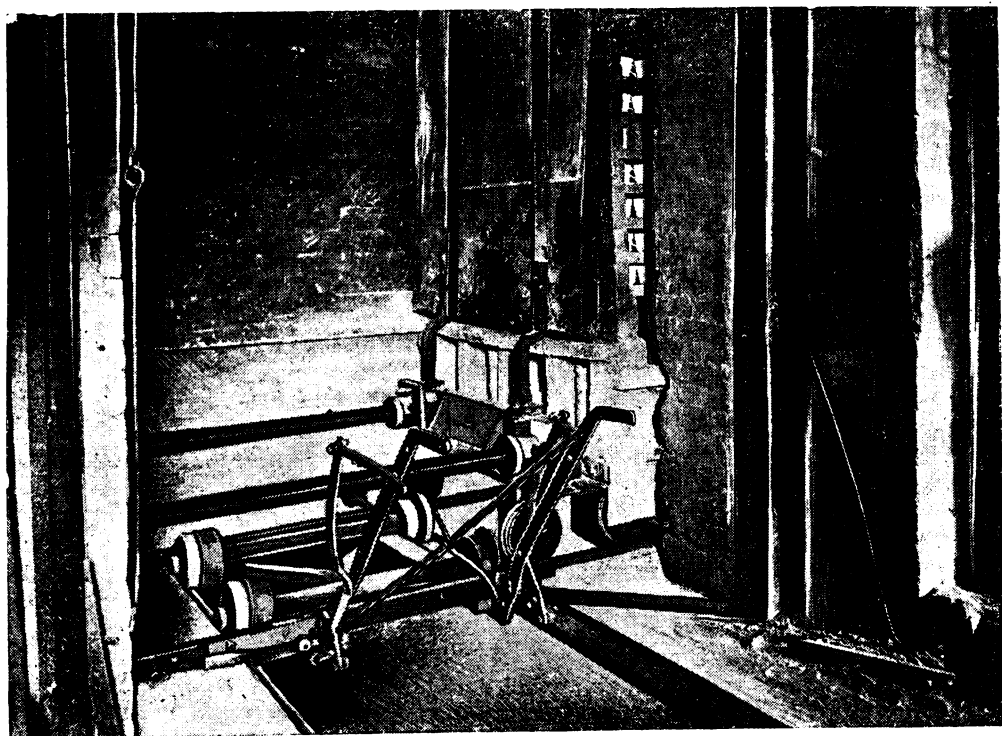


Рис. 139. Передаточная тележка и вестибюль туннельной печи.

Приводной механизм толкателя состоит из винта, толкающего через гаечную муфту два круглых штока, червячной передачи, контрпривода с прямыми и перекрестными ремнями для переключения на прямой и обратный ход и электромотора. Ременные передачи контрпривода рассчитаны таким образом, что прямой ход толкателя и, следовательно, период передвижения вагонеток происходит в течение 4 минут, а обратный ход, приблизительно, в два раза быстрее. При продвижении вагонеток мотор толкателя берет около 16 А (напряжение 220 В).

Для обеспечения своевременного открытия и закрытия шибера в зоне обжига и охлаждения имеется специальная сигнализация. Таким образом, в этих печах мы имеем периодическую и довольно быструю подачу вагонеток.

Зона подогрева в обеих печах имеет аналогичное устройство на протяжении от зоны обжига до отбора дымовых газов в боров (около 28 м) и представляет собой прямой туннель с сечением, расширяющимся книзу, начиная, примерно, с половины высоты канала. Расширение канала туннеля в нижней части имеет целью уменьшить сопротивление газов у пода вагонеток, увеличить скорость и газообмен, повысить температуру в нижней части туннеля и, таким образом, выровнять ее по высоте вагонетки. Входная часть туннеля от начала загрузочной камеры до боковых каналов, отводящих газы в боров, имеет прямые стенки соответственно габариту вагонеток. Минимальные зазоры между ставкой вагонетки и боковыми стенками туннеля дают уменьшение подсоса воздуха через неплотности шиберов входной части туннеля. Отвод отработанных дымовых газов — сосредоточенный — через два боковых канала, расположенных друг против друга. В печи № 1 боковые каналы входят под землей в общий боров и присоединяются последним к дымовой трубе.

В печи № 2 боковые каналы под сводом печи собираются в общий канал и присоединяются железным трубопроводом к дымо-сосу. В 1932 г. туннель печи № 2 в связи с резкими колебаниями вольтажа и количества оборотов вентилятора также присоединен к дымовой трубе туннеля печи № 1.

Как показала практика, при современной нагрузке туннельных печей дымовая труба обеспечивает их нормальную работу.

Зоны обжига в печах № 1 и № 2 имеют различное устройство. Как видно из рис. 140 и 141, топочная зона печи № 1 имеет незначительное расширение канала по сравнению с зоной подогрева, объемистую камеру для сжигания газа над вагонетками и по длине рассчитана на две вагонетки. Камера сжигания газа разделена арочной перегородкой, опускающейся до верха вагонеток, и имеет по четыре верхних горелки в стенах камеры.

Кроме того, имеется по четыре нижних горелки, расположенных в кладке стен топочной зоны на уровне нижних рядов загрузки вагонеток. Фактически работают 4 верхних и 2 нижних горелки. Горячий воздух к верхним и нижним горелкам подается из зоны охлаждения по каналам, расположенным в кладке стен туннеля. Газ в горелки поступает от газогенераторной станции по трубопроводу, расположенному над зоной обжига, и каналам, размещенным в кладке туннеля.

Небольшая длина нагретой части трубопроводов обеспечивает незначительный подогрев газа в печи № 1. Для наиболее точного регулирования в зоне обжига температуры, длины факела, а также и характера атмосферы, устроены вентили и клапаны, с помощью которых подача газа и горячего воздуха в горелки может меняться в широких пределах. В печи № 2 газ подогревается в надсводовом борове до температуры 200 °С. Во избежание поступления горячего воздуха из зоны охлаждения через загрузку вагонеток, устроен шибер, собранный из огнеупорных фасонных камней.

Шибера, отделяя зону охлаждения от зоны обжига, позволяет проводить и регулировать охлаждение вагонеток с разным давлением без какого-либо нарушения режима обжига от неравномерной подачи горячего воздуха в топочную зону, что, обычно, имеет место при отсутствии такого шибера. Во избежание быстрого сгорания шибера (главным образом, скрепляющей арматуры) отдельные огнеупорные плиты собраны на трубах, охлаждаемых циркулирующей в них водой.

Охлаждающая коммуникация с помощью гибкого шланга присоединена к водопроводной магистрали, что обеспечивает нормальную работу шибера, несмотря на частый его подъем и опускание. После передвижения вагонеток шибер опускается в промежуток между вагонетками.

В период осмотра туннельных печей комиссией „Росфарфора“ (в июле 1932 г.) огнеупорные шибера в обеих печах были подняты и не работали ввиду засорения охлаждающих труб накипью и отсутствия на заводе Сибфарфор запасных труб нужного сечения. Естественно, что отсутствие шибера привело к режиму работы, отступающему

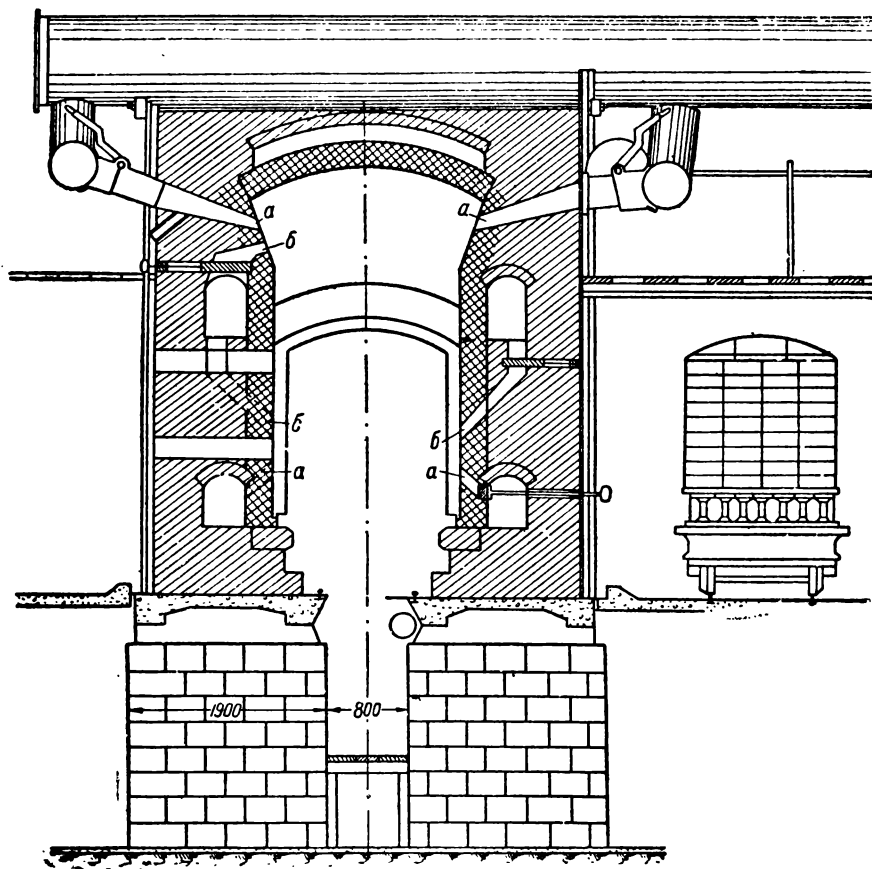


Рис. 141. Поперечный разрез топочной зоны.

щему от предусмотренного проектом, так как подавляющая часть воздуха для горения стала поступать не через каналы, заложенные в стенах туннеля, а непосредственно через зазоры в ставке вагонетки. Необходимо отметить, что завод в последние годы заменил загрузку вагонеток капсулами так называемой лещодочной загрузкой (см. рис. 144), т. е. ставкой на каркасе из огнеупорных плит. Помимо производственной и техно-экономической характеристики этого метода загрузки, приведенной в главе десятой, необходимо отметить и совершенно иное, чем при ставке изделий в капсулах, размещение каналов в загрузке вагонетки по ее поперечному сечению.

Зона обжига туннельной печи № 2 имеет иную конструкцию, чем зона печи № 1. Топочная камера ниже, чем камера в печи № 1



и не имеет разделяющей арки; свод, перекрывающий камеру, опускается в части, примыкающей к зоне охлаждения. Четыре верхние горелки расположены под сводом и вдоль печи по ходу вагонетки. Благодаря этому, пламя получает петлеобразное движение: под сводом по направлению движения вагонеток, а в нижней части туннеля — навстречу последнему.

Боковые горелки расположены по четыре с обеих сторон канала в два ряда: две горелки дают пламя в верхнюю часть вагонетки, а две другие — в нижнюю.

Газ для питания боковых и подсводовых горелок подается железным трубопроводом к средней части зоны подогрева и потом по каналу, заложеному над ее сводом, в коллектор топочной зоны. Из коллектора газ подается непосредственно в четыре подсводовые горелки и по каналам, заложеным в стенах, в боковые горелки. Длинный путь, проходимый газом в раскаленной кладке надсводовых каналов, обеспечивает подогрев его. Горячий воздух подводится через приемные окна зоны охлаждения в горелки по каналам, заложеным в кладке стен и свода.

С помощью шибера, так же как и в туннельной печи № 1, зона обжига после передвижения вагонеток отделяется от зоны охлаждения. Канал зоны охлаждения этой печи имеет ширину по габариту вагонетки и высоту большую, чем канал зоны подогрева. Получающееся при этом над поездом вагонеток свободное пространство облегчает отвод горячего воздуха и охлаждение вагонеток и предохраняет ходовые части вагонеток от перегрева, благодаря снижению давления воздуха в зоне охлаждения. Холодный воздух нагнетается навстречу раскаленным вагонеткам под свод и охлаждает наиболее горячую часть вагонеток; холодный воздух, имеющий больший удельный вес, чем горячий, опускается книзу вагонеток и, таким образом, вагонетка охлаждается достаточно равномерно. Свод и верхняя часть боковых стен в этой зоне охлаждаются самостоятельно путем принудительной циркуляции холодного воздуха в межсводовом пространстве и заложеным в стене каналах. Получающийся при этом подотретый воздух используется для отопления заводских помещений и для сушки. Для устранения выхода воздуха, нагнетаемого в канал зоны охлаждения по кратчайшему пути через выходную дверь, на расстоянии пяти метров от конца туннеля устроен подъемный шибер. Конец зоны охлаждения за шибером работает без принудительной циркуляции воздуха. Охлаждение осуществляется здесь за счет теплопередачи излучением и естественной конвекцией. Поэтому боковые стены в этой части зоны охлаждения выполнены в один кирпич, а сверху канал перекрыт чугунными плитами.

В зоне охлаждения печи № 2, как видно из рис. 138, надсводовое пространство сообщается с каналом туннеля и, таким образом, охлаждение вагонеток и свода, а также подача горячего воздуха в топочную зону и на производственные нужды связаны в одну систему и потому могут регулироваться в широких пределах, в зависимости от желательных режимов обжига и охлаждения и потребности в горячем воздухе для производственных нужд.

Остальные конструктивные элементы видны из приведенных рисунков.

Туннельные печи Хайтинского завода в отличие от других туннельных печей, устроены на каменных столбах вместо сплошных фундаментов, что, при наличии подвального помещения, дает доступное наблюдение за состоянием вагонеток и обеспечивает достаточное

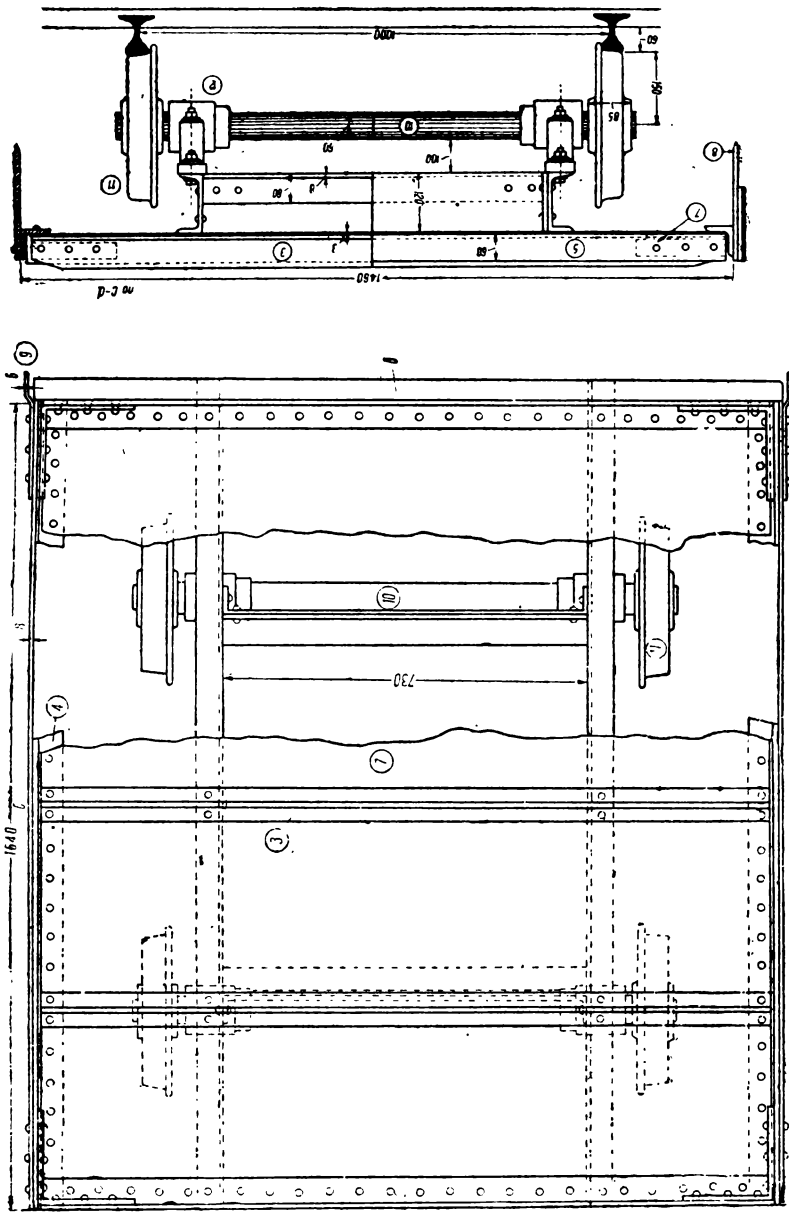
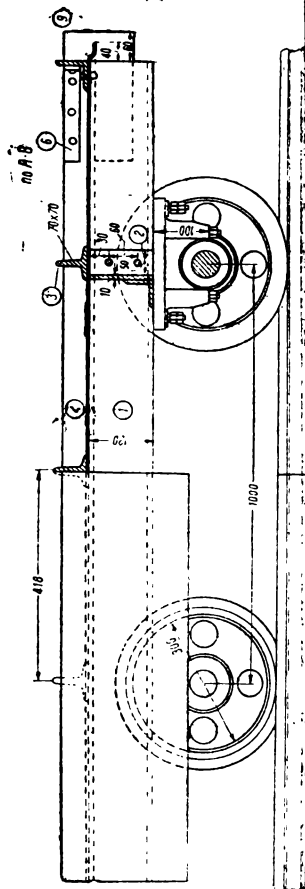


Рис. 142. Вагоетки хайтинской  
туннельной печи



естественное охлаждение подвижного состава. Вагонетки туннельных печей имеют весьма легкую конструкцию (рис. 142) и устроены на шариковых подшипниках. Они работают вполне удовлетворительно и не нуждаются в частом капитальном ремонте.

Для сопоставления стоимости отдельных элементов туннельных печей с другими газовыми печами приводим данные о затратах на печи и стоимости их оборудования (по ценам 1924—1928 гг.).

Стоимость печи № 1 . . . . .	73 125 р.
„ „ № 2 . . . . .	75 375 „
„ вагонеток (200 шт.) . . . . .	201 000 „
„ дымовой трубы . . . . .	10 379 „
„ дымососа с приводом . . . . .	7 504 „
„ газогенераторов . . . . .	9 768 „
	Всего . . . . . 377 151 р.
Стоимость помещения туннелей . . . . .	189 930 р.
„ „ для ремонта вагонов . . . . .	31 585 „
„ „ газогенераторов . . . . .	26 000 „
„ „ предгорнового и сортировочного отдела . . . . .	43 964 „
	Всего . . . . . 291 479 р.

Необходимо отметить, что состояние печей в момент изучения их работы (после длительной эксплуатации, как раз перед остановкой туннелей на ремонт) было неудовлетворительно, что отрицательно отразилось на показателях.

Кривые температуры по длине канала в туннеле № 1 и № 2 показывают отставание нагрева нижней части загрузки в зоне подогрева на 100—200° С (рис. 143). Температура по высоте выравнивается лишь в зоне обжига. Очевидно, что уплотнение стыков вагонеток и устранение засосов холодного воздуха дало бы более ровный подогрев и увеличение суточного пропуска через туннель.

Следует учесть, что при достаточной нагрузке вагонеток в предгорновом цеху и нормальном состоянии туннельных горнов Хайтинского завода производительность их может быть выше выпускаемых 24 вагонеток в сутки на одну печь.

В 1932 г., в виду утечки газа через изношенные трубопроводы и нерегулярной работы туннелей из-за недостатка нагруженных вагонеток, расход топлива значительно выходил за пределы нормального для печей этого типа и достигал с потерями газогенератора, в среднем, 2,97 *t* условного (7000 кал) топлива на 1 *t* готовой продукции — фарфора и около 0,18 *t* на 1 *t* загрузки вагонеток брутто (фарфор + шамотный каркас).

Большая разница в расходе условного топлива на 1 *t* фарфора и 1 *t* всей нагрузки вагонеток объясняется большим весом шамотного каркаса, применяемого заводом взамен капсулей.

При пропуске 24 вагонеток в сутки через туннель на 1 *t* фарфора расходуется 1,6 *t* условного топлива, включая потери газогенератора. Предварительные расчеты показывают, что, при увеличении нагрузки фарфора на вагонетки до общепринятых норм и устранении утечки газа, расход условного топлива на 1 *t* фарфора в этих печах можно снизить до 1,10—1,25 *t* условного топлива,

Туннельные печи политого фарфорового обжига и короткий туннель для обжига раскрашенных изделий питаются дровяным генераторным газом, получаемым с общего коллектора газогенераторной станции.

При отсутствии на заводе приборов для определения расхода газа на отдельные агрегаты, нельзя точно разграничить расход топлива по каждой печи и потому приведенные цифры являются приближенными.

Температуры пламени, замеренные в зоне обжига на уровне верха и низа вагонетки, весьма близки друг к другу. Однако, проверка температуры обжига изделий в разных местах вагонетки с помощью конусов Зегера показывает значительную разницу конечных температур обжига, что объясняется неравномерным прогревом изделий и лещодочного каркаса в зоне подогрева и кратковременным пребыванием вагонеток в зоне обжига, недостаточным для выравнивания температур.

Таблица 56

№ печи	Дата про- верки (1932 г.)	Температура в °С			Разница темпе- ратур (в °С)			Примечание
		верх	середина	низ	верх— середина	сере- дина— низ	верх— низ	
1	30/IV	1435	1335	1300	100	35	135	Нормальная температура обжига 1320—1350 °С
2	7/V	1415	1385	1355	30	30	60	
2	7/V	1395	—	1300	—	—	95	
1	9/V	1400	1305	1310	95	5	90	
2	20/VI	1390	1355	1350	35	5	40	
1	21/VI	1385	1350	1350	35	0	35	

Температура определялась по конусам Зегера, установленным на лещодочном каркасе и на капсульках в верхней части вагонетки с некоторыми поправками, в зависимости от степени оплавления конусов.

Верхняя часть вагонетки нагружается блюдцами в капсулях, а нижняя часть — на открытых плитах, поэтому получаемая разница температур сглаживается в верхней части замедлением передачи тепла через стенки капсуля, и действительная температура обжига изделий, загруженных в капсули по верху лещодочной стенки, ниже приведенной в таблице.

Разные способы нагрева верхней и нижней части вагонетки дают возможность уменьшить разницу конечных температур нагрева изделий и получить удовлетворительное качество фарфоровой посуды. Фарфор получается белый без каких-либо дефектов обжига (например, прыща, желтизны, закопченности, пережога и других видов брака). Посортный выход не отличается от выхода фарфора из нормально работающих круглых печей.

Устранение засосов между вагонетками и приведение в порядок шиберов зоны обжига приведет к общему улучшению теплового режима печи и даст еще лучший сортный выход фарфора, одновременно с увеличением выпуска.

Принятый в последние годы на Хайтинском заводе способ загрузки вагонеток на каркасе из шамотных плиток (рис. 144) дает низкий коэффициент использования кубатуры, примерно, 40—50 кг на 1 м<sup>3</sup> вагонетки, в зависимости от ассортимента выпускаемой посуды. Более подробная характеристика методов загрузки печных камер и вагонеток приведена дальше в специальном разделе.

Как видно на рис. 144, вагонетки туннелей Хайтинского завода имеют одну особенность: пустотелую футеровку пода в камерах, используемых для обжига утиля. Емкость подовых камер при ассортименте посуды, допускающим плотную загрузку, в утильном обжиге почти соответствует современной пропускной способности туннелей в политем обжиге.

Однако, при уплотненной загрузке вагонеток политем фарфором, утиля, обжигаемого в подовых камерах, едва ли хватит даже при ассортименте с преобладанием тарелок и блюдец, дающих наиболее плотную загрузку в этих камерах.

Обжигаемая на утиль посуда вместе с изоляцией (отходы слюды толщиной в 50 мм) и воздушными прослойками является плохим проводником тепла. Благодаря этому металлическая часть вагонетки не перегревается и не нуждается в частом ремонте. Утиль в части, при-

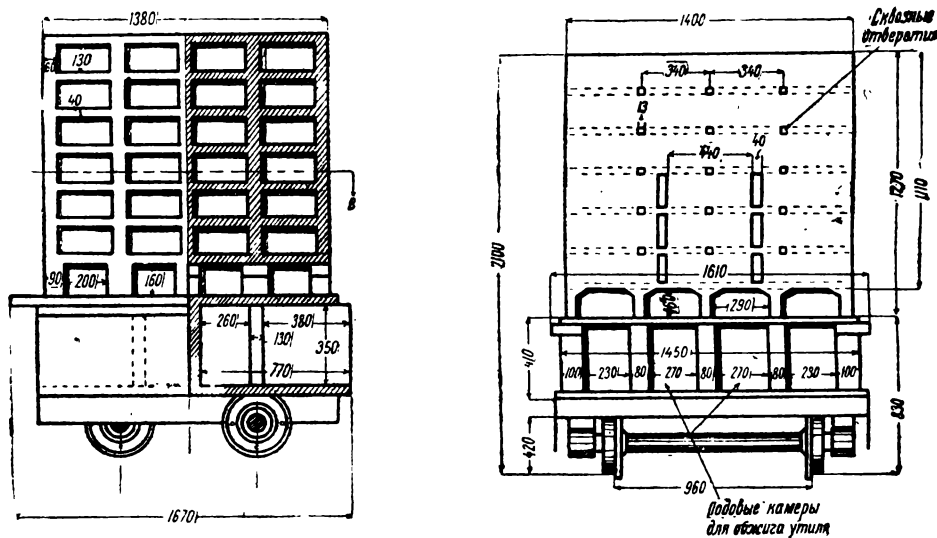


Рис. 144. Каркасная загрузка вагонетки хайтинской туннельной печи.

легающей к верхнему ограждению камеры, обжигается нормально, тогда как в нижних ярусах он остается слабо обожженным. Фарфоровая масса Хайтинского завода даже при слабом обжиге утиля не дает прыща, хотя, как видно из температурной кривой (см. рис. 143), нагрев в политем обжиге производится без какой-либо выдержки (замедления в повышении температуры) для окончания процесса дегидратации.

Столь благоприятные результаты, повидимому, следует отнести за счет специфических свойств местного каолина. Возможность использования обжига на утиль в подобных камерах — что по идее вполне рационально — при других фарфоровых массах должна быть все же предварительно проверена в смысле обеспечения нормального качественного выхода продукции.

Первый и притом удачный опыт постройки туннельных печей без иностранной помощи в проектировании и строительстве заслуживает всестороннего изучения и использования.

### III. Печи системы Хирта (Hirt)

Печи системы Хирта построены в СССР на Семилукском и Сухоложском заводах для обжига огнеупорного шамотного припаса; однако такие печи могут использоваться и для обжига фаянса. Работа этих туннельных печей детально исследована Ленинградским областным теплотехническим институтом (ЛОТИ).

Две первые печи, построенные на шамотном заводе в Семилуках, имеют одинаковую конструкцию и следующие размеры:

Длина туннеля (90 вагонеток) . . . . .	148,7 м
"  зоны подогрева (42 вагонетки) . . . . .	70,86 м
"  "  обжига (9 вагонеток) . . . . .	14,9 "
"  "  охлаждения (39 вагонеток) . . . . .	62,9 "
Длина туннеля вместе с загрузочной камерой, отделяемой от печного канала шибером и вмещающей две вагонетки . . . . .	152 "
Ширина канала печи . . . . .	2,2 "
Высота канала от пода вагонетки до пяти свода . . . . .	1,49 "
Высота канала от пода вагонетки до замка свода . . . . .	1,785 "

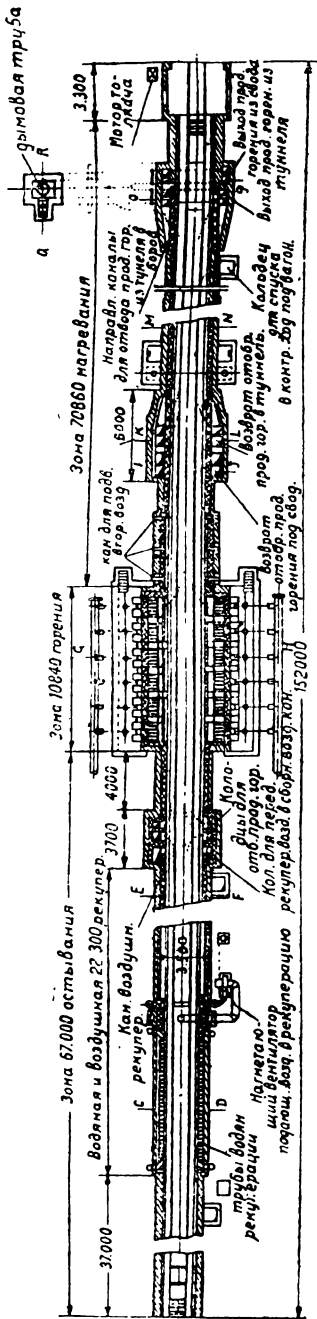


Рис. 146. Туннельная печь Хирта.

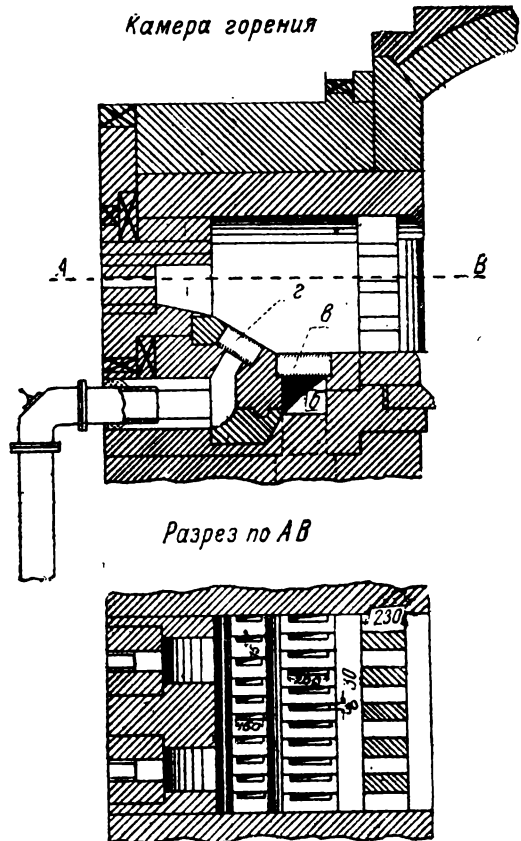


Рис. 147. Допка печи.

Схема движения газов в печи системы Хирта имеет принципиальное отличие от обычной схемы для туннельных печей (рис. 145).

В основном это отличие заключается в разделении топочных газов на два потока: один из них направляется навстречу поезду вагонеток в зону подогрева, другой — в одном направлении с движением вагонеток в зоне остывания, где топочные газы должны смешиваться с горячим воздухом зоны охлаждения (на участке позиций 53-й и 54-й вагонеток). Смесь топочных газов и воздуха через отверстие и каналы, расположенные в стенках туннеля, подается в надсводное пространство зоны подогрева на участке позиций 36—39-й вагонеток. Эта схема движения газов практически не осуществилась по ряду отмеченных ниже обстоятельств.

Другой особенностью печей системы Хирта является конструктивное выполнение отдельных зон туннеля.

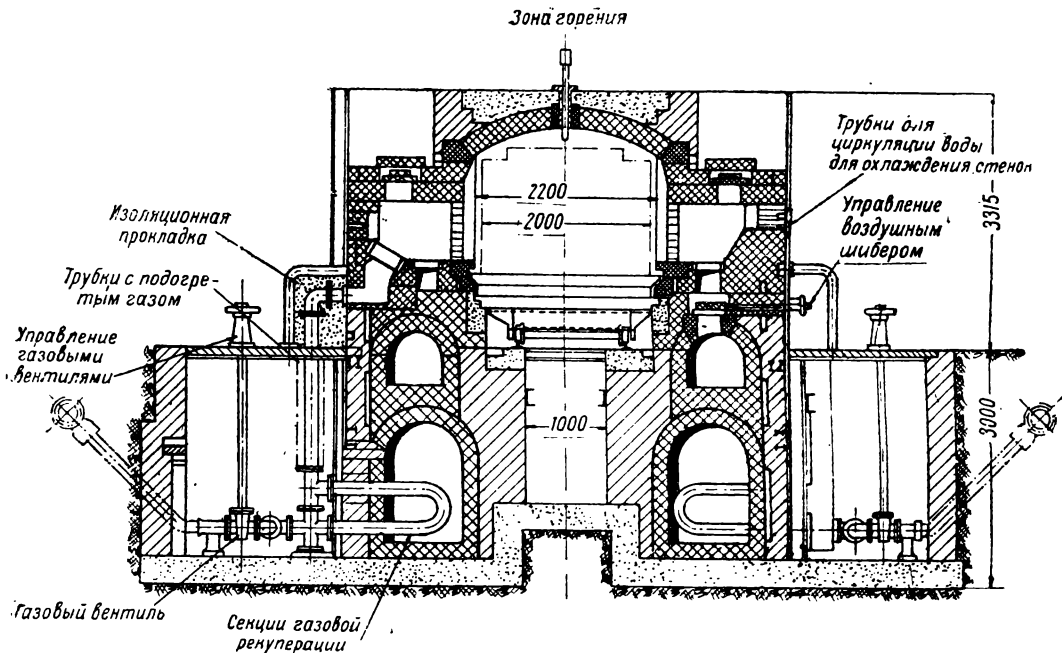


Рис. 148. Топочная зона.

С обеих сторон зоны обжига имеется по шесть газовых топков, расположенных (в отличие от часто практикующегося шахматного размещения) прямо друг против друга (рис. 146).

Топки питаются генераторным газом, получаемым от центральной газогенераторной станции завода, работающей на антраците. Крупные топочные камеры, устроенные для смешения газа с горячим воздухом и частичного его сжигания, отделены от канала туннеля распределительной решеткой, выложенной из огнеупорного кирпича (рис. 147).

После интенсивного перемешивания газа с воздухом, при прохождении через отверстия распределительной решетки, догорание газа заканчивается уже в канале туннеля.

Генераторный газ перед поступлением в топки подогревается в стальных U-образных рекуператорах за счет тепла смеси продуктов горения и горячего воздуха, отбираемых вначале зоны охлаждения и проходящих под топками по горизонтальному каналу (рис. 148).





загрузки, приводит к более редкой ставке в нижней части вагонеток (рис. 150).

Однако, несмотря на регулирование плотности ставки по высоте вагонеток, влияние расслоения потока газов сказывается в наличии большой разницы температур в зоне подогрева. Эта разница увеличивается еще и вследствие большого подсоса воздуха из-под вагонеток через песочные затворы и неплотные стыки. Специальных устройств для предотвращения или уменьшения подсоса воздуха в печной канал в конструкции туннеля системы Хирта не предусмотрено.

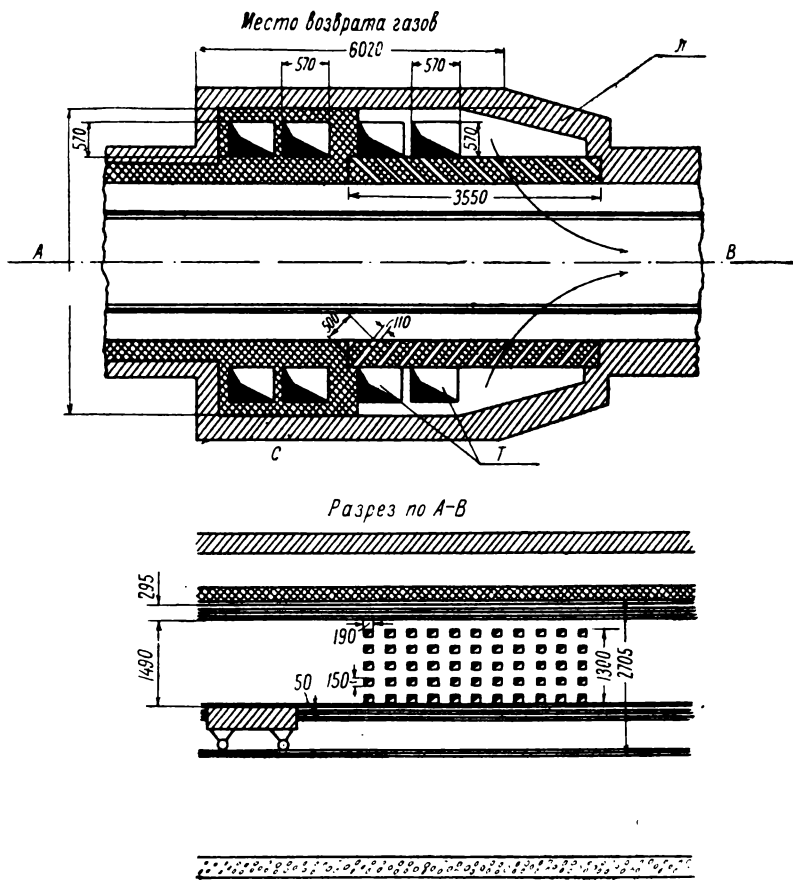


Рис. 149. Каналы для возврата газов в зону подогрева.

Отбор дымовых газов сосредоточен вначале зоны подогрева на протяжении позиции 3—5 и выполняется с помощью газосборных каналов (рис. 151), сходных по конструкции с каналами для возврата газовой смеси в зону подогрева. Из последней газы отводятся в поперечный газоотвод-боров *I* через вертикальные каналы *T*, а газы из надсводового пространства, расположенного над всей зоной подогрева, отсасываются в атмосферу через вертикальные каналы *C* и поперечный боров *И*. Побудителем для отсасывания дымовых газов является эксгаустерная установка, работающая по принципу инжекции.

Разрежение в зоне подогрева и в надсводовом пространстве

регулируется шиберами, установленными в поперечных борвах I и II.

Зона охлаждения туннеля системы Хирта по своей конструкции

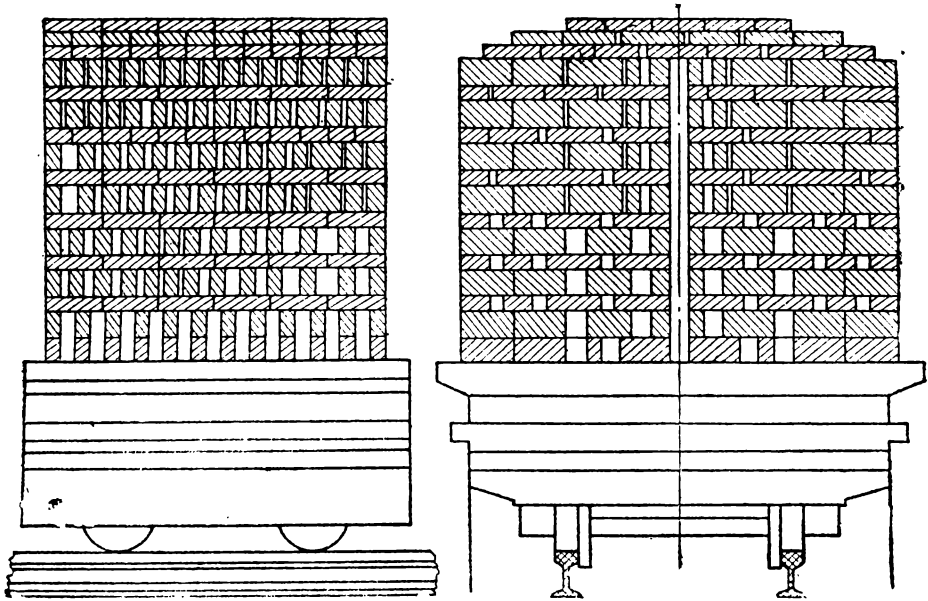
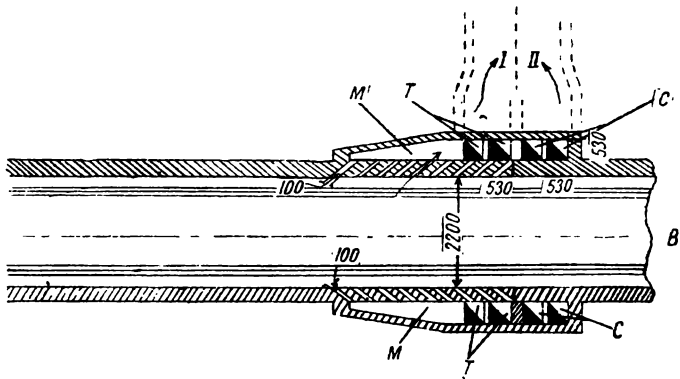


Рис. 150. Садка (загрузка) вагонетки.



Разрез по А-В

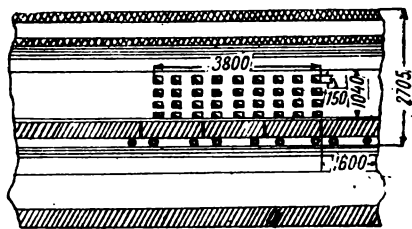


Рис. 151. Отвод газов в борвах.

рассчитана на муфельное охлаждение кирпича, выходящего из зоны обжига, с помощью водяной и воздушной рекуперации.

У выходного конца туннеля охлаждение должно происходить, по идее конструкции, исключительно за счет теплоотдачи через свод и стены туннеля в окружающую атмосферу (рис. 152, разрез

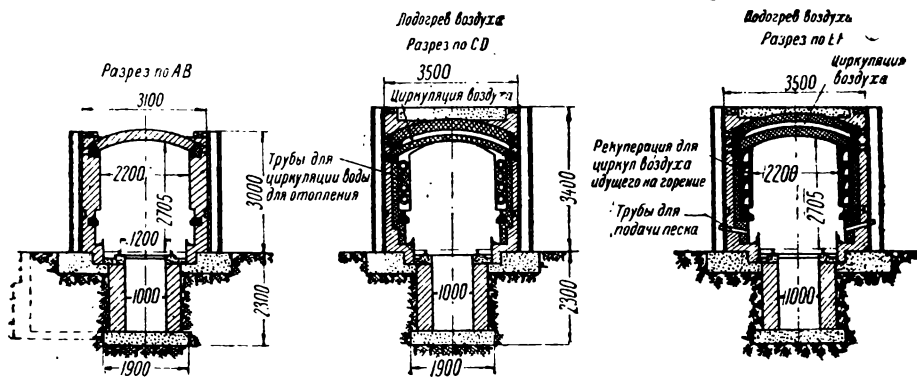


Рис. 152. Зона охлаждения.

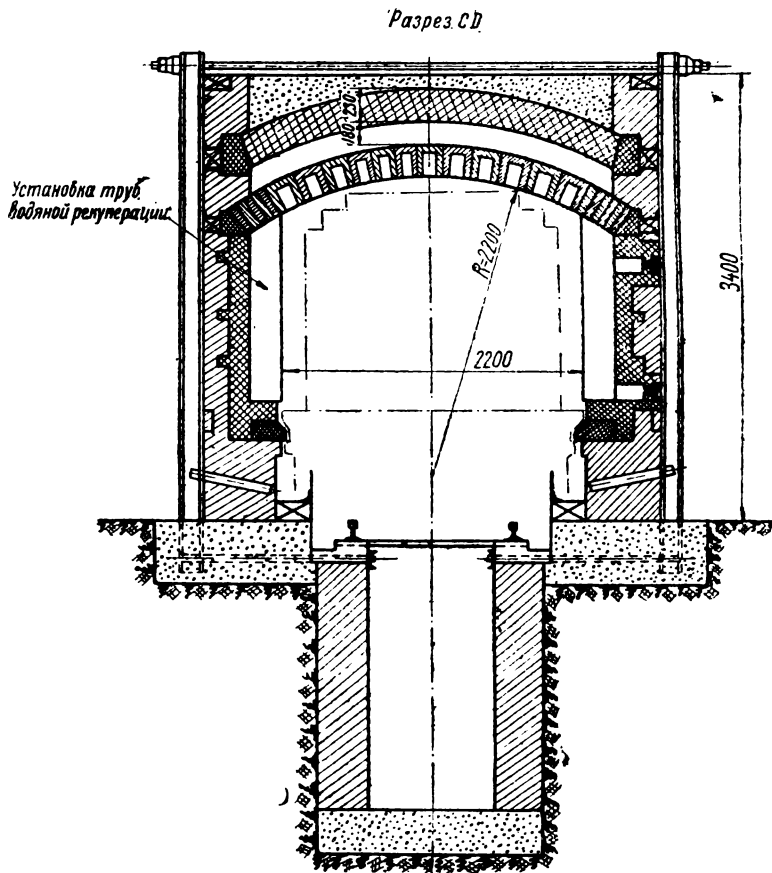


Рис. 153. Зона водяной рекуперации.

по АВ). Далее охлаждение производится системой водяных ребристых труб и воздухом, омывающим тонкий свод из огнеупорных корытообразных камней (рис. 153; см. также рис. 152). Этот участок

зоны охватывает около 9,5 м (позиции 62—68). Поверхность нагрева ребристых труб—20 м<sup>2</sup>. Циркуляция воды—принудительная, от центробежного насоса; подогрев воды около 90° С.

Воздух, засасываемый через надсводовое пространство на участке водяной рекуперации, нагнетается в надсводовое пространство и муфельные каналы воздушной рекуперации длиной в 13,3 м (54 до 61 позиции вагонеток).

Боковые горизонтальные каналы, через которые нагнетается воздух на этом участке, образуются керамическими коробками, уложенными одна на другую. Свод, перекрывающий зону охлаждения на этом участке, выложен из фасонного шамота.

Воздух, нагнетаемый через металлические распределительные трубы, надсводовое пространство и боковые муфельные каналы, нагревается до высокой температуры и по распределительному каналу, проходящему под топками, в вертикальном и горизонтальном направлениях подается как в топки, так и в качестве вторичного воздуха— в конец зоны подогрева.

Основной целью устройства муфельного воздушного охлаждения, а также обвода части топочных газов и горячего воздуха мимо зоны обжига, является создание положительного давления при подаче воздуха в топки и обеспечение такого давления в канале зоны обжига при одновременном сохранении разрежения в зонах охлаждения и подогрева. Однако, как это будет видно из дальнейшего изложения, получить намеченную в проекте кривую давлений (см. рис. 154), обеспечивающую соответствующие скорости движения газов, на практике по целому ряду обстоятельств не удастся. Поэтому устройство сложной по конструкции и недолговечной в эксплуатации зоны рекуперативного (муфельного) охлаждения до сих пор еще себя не оправдало.

По данным испытания туннельной печи № 1 системы Хирта на шамотном заводе в Семилуках, проведенного ЛОТИ в период не вполне еще налаженной работы печи (конец 1931 г.), работа ее характеризуется следующими данными:

Производительность в сутки—115 т . . . . .	в час 1 вагон = = 4,8 т или 1'480 шт. 3100 м <sup>3</sup> /час
Расход газа калорийностью в 1214 ккал/м <sup>3</sup> . . . . .	
Средний состав газа (генераторный антрацитовый): CO <sub>2</sub> —2,6%, O <sub>2</sub> —0,4%, CH <sub>4</sub> —0,8%, CO—28,8%, H <sub>2</sub> —10,4%, N <sub>2</sub> —57,0%	
Температура обжига . . . . .	1280—1300° С
Температура генераторного газа перед поступлением в топочную камеру (без подогрева из-за прогорания стальных рекуператоров) . . . . .	20° С
Температура воздуха, поступающего для горения в топки . . . . .	277° С
Расход воздуха на горение (температура 0° С, давление 760 мм рт. ст.) . . . . .	4380 м <sup>3</sup> /час
Средняя влажность огнеупорного кирпича, поступающего в печь . . . . .	12%, 8%
Потеря от прокаливания . . . . .	80%
Температура газов, отходящих в борове . . . . .	240° С
Содержание в отходящих газах CO <sub>2</sub> . . . . .	6,4%
Температура кирпича при вступлении в зону охлаждения . . . . .	1140° С
Средняя температура футеровки вагонетки при вступлении в зону охлаждения . . . . .	550° С
Вес футеровки вагонетки на 1 т обожженного кирпича . . . . .	0,62 т
Температура кирпича по выходе из печей—вверху . . . . .	500—600° С
—внизу . . . . .	150° С
Средняя температура футеровки вагонетки по выходе из печи . . . . .	125° С
Температура в помещении печного цеха . . . . .	15° С

Кривая давлений резко отличается от кривой, намеченной фирмой по проекту, и характеризуется графиком, приведенным на рис. 154 (низ печи).

Верхняя пунктирная кривая давлений характеризует работу печи при закрытых сводовых шиберах зоны подогрева, когда продукты горения отбираются лишь через канал зоны подогрева. Нижняя кривая показывает режим давлений при открытых сводовых шиберах, когда часть продуктов горения отбирается через сводовые отверстия и надсводное пространство зоны подогрева. Более высокое положительное давление в зоне обжига, имеющее место в первом случае, являлось причиной выбивания горячих газов через неплотности вагонетки под туннель, перегрева вагонеток, заедания в буксах и аварий

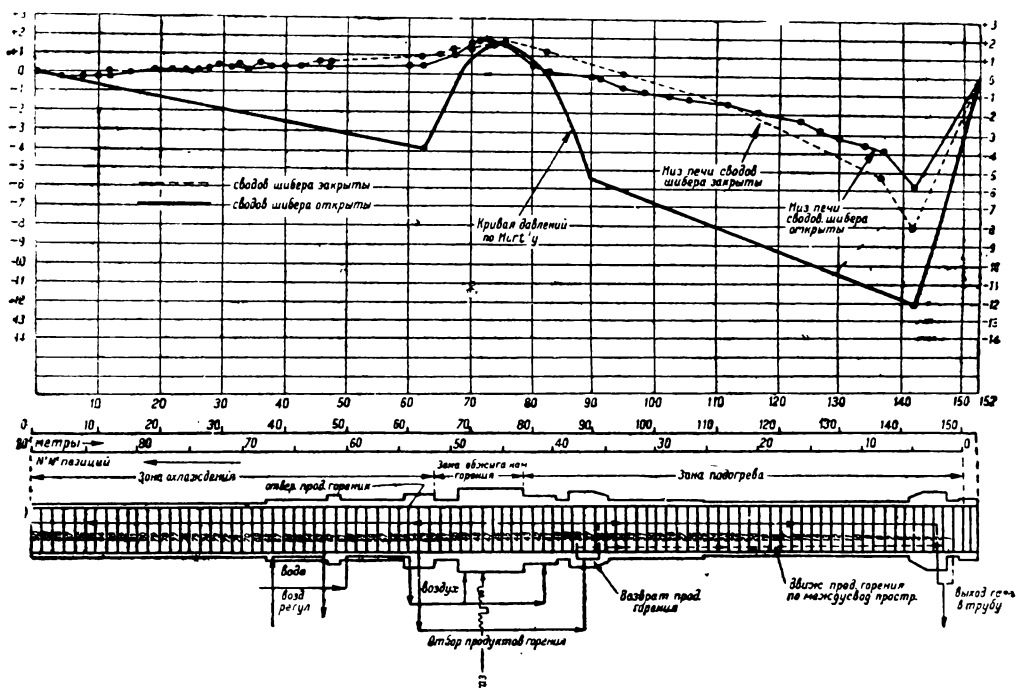


Рис. 154. Кривая давлений.

толкача. Понижение давлений при открытии сводовых шиберов в значительной мере улучшило работу подвижного состава. Максимальная температура под вагонетками на уровне 0,4 м ниже осей скатов снизилась с 250 до 125° С.

Однако, такое решение вопроса является временным паллиативом и не обеспечивает нормальной работы туннелей, вследствие увеличения разности температур по высоте вагонеток.

Более рациональным мероприятием является усиление тяги и улучшение уплотнения зазоров между вагонетками и в песочных затворах для уменьшения засосов холодного воздуха.

В целях повышения температур в зоне подогрева газовых топков, питание последних производится с максимальной подачей топлива и воздуха в первые топки и постепенным снижением подачи в последние топки.

Во время испытаний печей процесс горения, в значительной мере, протекал в печном канале. Это обстоятельство характеризуется

более темным цветом топочной распределительной решетки, выделяющейся на светлом фоне раскаленной ставки вагонеток. Горение заканчивалось на расстоянии около 5 м от конца топочной зоны.

Кривые температур и газовой среды в зонах подогрева, обжига и охлаждения (и, в известной мере, режим обжига кирпича) приведены на рис. 155.

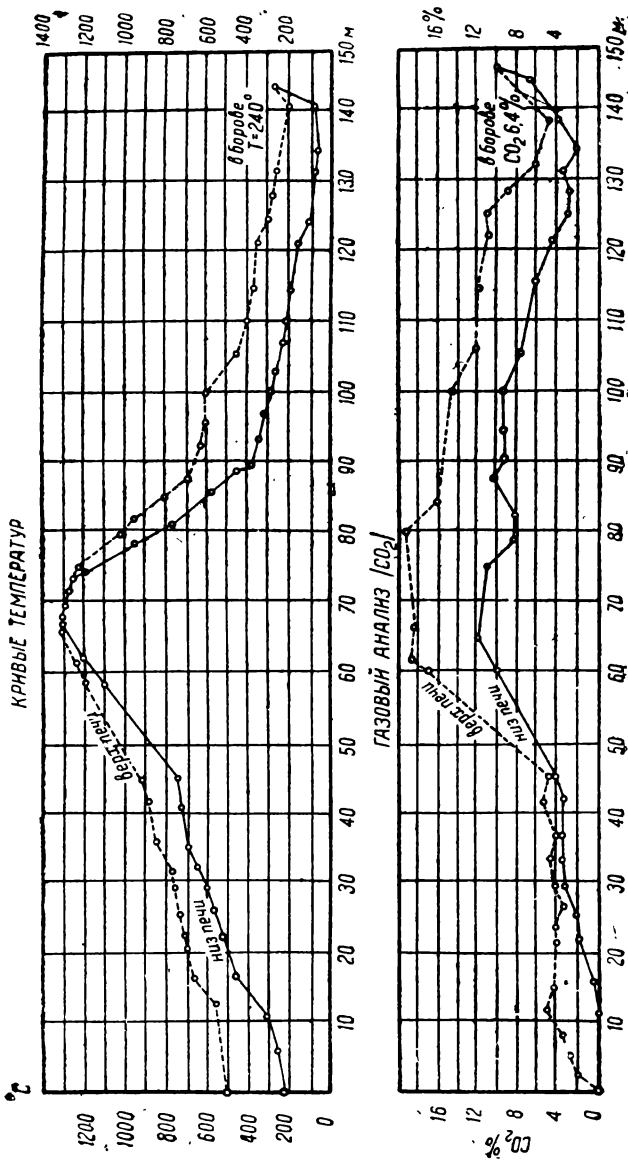


Рис. 155. Кривые температур и газовой среды.

Основным дефектом работы печи Хирта является большой разрыв между температурами верха и низа вагонетки в зоне подогрева, вследствие засоса холодного воздуха из-под вагонеток, что отмечается на второй диаграмме (низ рис. 155) резким падением содержания CO<sub>2</sub> в продуктах горения.

Вторым недостатком работы этих печей является выбивание продуктов горения в зону охлаждения, которое получается вследствие

отмеченного выше невыполнения в данной конструкции печи ожидаемого режима давления (см. сопоставление проектной и фактической кривых давлений на рис. 154).

Поступление топочных газов в зону охлаждения подтверждается анализом газов этой зоны (наличие  $\text{CO}_2$  до конца зоны).

Разрежение в печном канале перед выходом в боров — 4 мм вод. ст., а за распределительной решеткой в вертикальных газоходах — 6 мм; разрежение в борове — 15 мм.

Большая разница в содержании  $\text{CO}_2$  сверху канала и у пода вагонеток в данной печи наблюдается, начиная с зоны обжига, где имеется положительное давление и потому влияние засосов воздуха из-под вагонеток исключается. Причиной неодинакового избытка воздуха сверху и внизу печного канала является неудовлетворительное перемешивание газа с воздухом в топочной камере, которое, при стремлении иметь под сводом полное сгорание, вызывает подачу в нижнюю часть канала большого избытка воздуха.

Топочный газ, выйдя из зоны обжига, разветвляется на два потока: один поток (около 65% всего объема газов) направляется непосредственно в зону подогрева, а второй — сначала направляется к зоне охлаждения, а потом уже по обводному каналу проходит в канал или надсводное пространство зоны подогрева.

Разность температур по высоте вагонетки не одинакова в разных стадиях обжига. В зоне подогрева разницы температур в верхней и нижней части вагонетки достигает  $300^\circ\text{C}$ . В зоне обжига температуры выравниваются и разность по высоте снижается здесь до  $30^\circ\text{C}$ .

Фасонные шамотные коробки рекуперативной зоны охлаждения оказались в эксплуатации недолговечными. Однако, их замена муфельной стенкой в  $1/2$  кирпича, проведенная при ремонте печи, также нецелесообразна, так как задерживает охлаждение и снижает температуру воздуха, поступающего в топку. Ребристые трубы водяного охлаждения при ремонте были сняты, так как оказались поврежденными в эксплуатации.

Отмеченные обстоятельства, вместе с ненормальным потоком газов из зоны обжига к выходному концу, привели к тому, что обожженный кирпич выходил из туннеля с высокой температурой (в среднем,  $300 - 400^\circ\text{C}$ ).

Работа зоны охлаждения характеризуется следующими данными:

Часовой расход воздуха через рекуперативные каналы (в состоянии, приведенном к нормальным условиям, при температуре в $0^\circ\text{C}$ и давлении в 760 мм рт. ст.) . . . . .	4 320 м <sup>3</sup>
Разрежение в конце надсводного пространства на участке водяной рекуперации . . . . .	8—9 мм
Давление воздуха при входе во вторую систему рекупераций (воздушную) . . . . .	20—25 .
Давление в распределительном воздушном канале, питающем топку горячим воздухом . . . . .	1—2 мм вод. ст.
Сопrotивление канала печи зависит от системы ставки (садки) кирпича на вагонетки и в свою очередь определяет ряд показателей работы печи:	
При сечении канала печи, равном 3,71 м <sup>2</sup> , нагрузке вагонетки, равной 240 шт. на м <sup>2</sup> , свободном сечении для прохода газов, равном 1,43 м <sup>2</sup> (в том числе зазоры между ставкой, стенами и сводом канала составляют 0,2 м <sup>2</sup> ), сопротивление канала (при приведенной к нормальной температуре в $0^\circ\text{C}$ , давлении в 760 мм рт. ст. и скорости газов $v = 1$ м/сек) составляет, приблизительно, . . . . .	0,07 мм вод. ст.

В зоне обжига сопротивление в канале печи для приведенной скорости в 0,45—0,84 м/сек . . . . .	0,1 мм вод. ст.
Действительная скорость движения топочных газов в сторону зоны подогрева (при средней температуре 960° С, давлении 760 мм вод. ст., расходе газов — 65% от общего расхода) . . . . .	3,6 м/сек
Действительная скорость движения газов в сторону зоны охлаждения с обводом (при средней температуре 1200° С, давлении 760 мм вод. ст., расходе газов — 35% от общего расхода) . . . . .	2,4 м/сек

Тепловой баланс печи системы Хирта (по состоянию в период обследования—декабрь 1931 г.)

### I. Зона нагрева и обжига

Приход тепла:	Кал в час	%
1. Теплотворная способность топлива . . . . .	3 763 400	90,29
2. Физическое тепло газа . . . . .	18 730	0,45
3. Тепло подогретого воздуха, поступающего на горение . . . . .	378 000	8,93
4. Тепло кирпича, поступающего в печь . . . . .	13 700	0,33
Итого . . . . .	4 173 830	100,00

Расход тепла:		
1. Испарение и перегрев гигроскопической влаги . . . . .	503 000	12,07
2. Расход тепла на химические реакции, по Мак-Ту, . . . . .	464 700	11,14
3. Потеря тепла с отходящими газами . . . . .	1 132 900	27,10
4. Тепло кирпича, поступающего в зону охлаждения . . . . .	1 520 000	36,57
5. " " футеровки вагонеток . . . . .	384 600	9,22
6. Потери в окружающую среду и ошибки опыта . . . . .	168 639	3,90
Итого . . . . .	4 173 830	100,00

### II. Зона остывания

Приход тепла:		
1. Тепло кирпича, вступающего в зону охлаждения . . . . .	1 520 000	79,81
2. " футеровки вагонеток, вступающих в зону . . . . .	384 600	20,19
Итого . . . . .	1 904 600	100,00

Расход тепла:		
1. Тепло, отбираемое воздухом в воздушных рекуператорах . . . . .	351 000	18,45
2. " уносимое кирпичом при выходе из печи . . . . .	426 250	22,4
3. " " футеровкой выходящих из печи вагонеток, . . . . .	75 500	3,95
4. Потеря тепла в окружающую среду на нагрев воздуха, уходящего через щели; ошибки наблюдений и т. п. . . . .	1 051 850	56,20
Итого . . . . .	1 904 600	100,00

### III. Баланс всей печи

Приход:		
1. Теплотворная способность топлива . . . . .	3 763 400	99,15
2. Физическое тепло топлива . . . . .	18 730	0,49
3. Тепло кирпича, поступающего в печь . . . . .	13 700	0,36
Итого . . . . .	3 795 830	100,00

Расход:		
1. Испарение и перегрев гигроскопической влаги . . . . .	503 000	13,25
2. Расход тепла на химические реакции . . . . .	467 700	12,24
3. Потеря тепла с отходящими газами . . . . .	1 135 900	29,58
4. Тепло, уносимое товаром при выходе из печи . . . . .	426 250	11,23
5. " " из печи футеровкой вагонеток . . . . .	75 500	1,99
6. Потери в окружающую среду, ошибки опыта и пр. . . . .	1 193 480	31,31
Итого . . . . .	3 795 830	100,00



**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**

Страница отсутствовала в книге

**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**



**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**

**Страница отсутствовала в книге**



нетками устроен сквозной контрольный коридор. Однако, недостаточная высота коридора, обусловленная высоким уровнем грунтовых вод, является дефектом данной печи, затрудняющим регулярную ревизию поезда и обслуживание системы, охлаждающей металлическую конструкцию вагонеток.

На рис. 171 и 172 показаны графики температур и газовой среды, заснятые в период испытания и наладки печи.

### ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ И ТЕПЛОВЫЙ БАЛАНС ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ТИПА ДРЕССЛЕРА ПРИ ОБЖИГЕ НИЗКОВОЛЬТНОГО ИЗОЛЯЦИОННОГО ФАРФОРА<sup>1</sup>

1. Продолжительность испытания . . . . .	115,5 час.
2. Загрузка на вагонетке — около 50% нормальной (низкий коэффициент использования печного объема объясняется временной неполной нагрузкой туннельной печи в период ее испытания):	
а) фарфора, по воздушно-сухому весу с влажностью 3,23% . . . . .	524 кг
б) необходимого шамота-капселей, плит с влажностью 4,1% . . . . .	532 "
в) обожженного шамота-капселей, плит, огнеупорных камней . . . . .	2408 "
3. Габаритный объем садки на вагонетке (около) . . . . .	6 м <sup>3</sup>
4. Количество пропущенных за период испытания вагонеток . . . . .	56 шт.
5. Средняя скорость состава . . . . .	70,97 м/час
6. Расход мазута в час . . . . .	185,4 кг
7. Теплотворная способность мазута . . . . .	9850 кал/кг
8. Температура обжига . . . . .	1287 °С
9. Температура уходящих дымовых газов . . . . .	150 °С
10. Удельный расход мазута на 1 м <sup>3</sup> садки вагонетки . . . . .	64 кг
11. " " " " 1 кг загрузки (фарфор и шамот) . . . . .	0,39 кг

#### Сводный тепловой баланс

##### Приход тепла

	кал/час	%
1. Теплотворная способность мазута . . . . .	1 826 000	98,2
2. Физическое тепло мазута . . . . .	3 000	0,0
3. Тепло воздуха, поступающего в форсунки . . . . .	19 000	1,0
4. " вносимое вагонетками . . . . .	16 000	0,8
	<hr/>	
	1 864 000	100,0

##### Расход тепла

1. Тепло, затраченное на физико-химические реакции обжига:		
а) фарфора . . . . .	12 000	0,6
б) необожженного шамота . . . . .	28 000	1,5
в) плавления глазури . . . . .	1 000	—
2. Тепло на испарение влаги фарфора и необожженного шамота . . . . .	14 000	0,8
3. Тепло, уносимое из печи вагонетками:		
а) фарфором . . . . .	7 000	0,4
б) капселями . . . . .	45 000	2,4
в) вагонеткой и подставками (металлические части, футеровка просфоры, шамотные плиты) . . . . .	63 000	3,4
4. Тепло воздуха, используемого для сушки . . . . .	453 000	24,3
5. Потери в окружающую среду:		
а) через стены печи . . . . .	382 000	20,5
б) " свод печи . . . . .	240 000	12,8
в) " под вагонеток . . . . .	83 000	4,5
6. Потери тепла с отходящими газами (физическое тепло) . . . . .	281 000	15,1
7. " от неполного сгорания (химический недожог) . . . . .	103 000	5,5
8. Неучтенные потери . . . . .	152 000	8,2
	<hr/>	
	1 864 000	100,0

<sup>1</sup> Данные заимствованы из отчета ВНИИК по обследованию туннельной печи завода „Пролетарий“ (четвертое испытание). Тр. ВНИИК, Ленинград, 1934.

Приведенный тепловой баланс, в виду неполной загрузки, дает лишь приближенное представление о расходе тепла по отдельным статьям. При доведении загрузки вагонеток до нормы, резко повышается процент используемого тепла по статьям 1, 2 и 3, с соответствующим снижением удельного веса тепловых потерь.

Более точную и устойчивую характеристику работы печи дают цифры удельного расхода на 1 м<sup>3</sup> печного объема (в печи Дресслера составляющий 64 кг/м<sup>3</sup>). Этот расход остается без больших изменений при колебаниях загрузки вагонеток в связи с изменением ассортимента продукции или по другим производственным причинам.

Туннельная печь системы Дресслера для обжига шамотного огнеупорного кирпича построена в 1928 г. на Часов-Ярском заводе им. X годовщины Октября. В соответствии с иными требованиями к обжигу и условиями использования газового топлива, эта печь имеет ряд существенных отличий от печи завода „Пролетарий“.

Конструкция и работа печи Часов-Ярского завода характеризуются следующими данными:<sup>1</sup> длина туннеля 113 м. В зоне подогрева находится 20 вагонеток, в зоне обжига (топочной) 10 вагонеток, в зоне охлаждения 28 вагонеток.

Туннельная печь Часов-Ярского завода не имеет сквозного контрольного канала под поездом вагонеток. Канал устроен лишь под топочной зоной, что является крупным недостатком данной конструкции.

При положительном давлении в зоне обжига, наиболее благоприятном для получения равномерного обжига, неизбежно прохождение газов через неплотности песочных затворов вагонеток и связанные с этим деформации опорных частей последних и заедания подшипников, приводившие к довольно частым авариям. Температура под вагонетками достигает 400° С, что мешает использованию даже короткого контрольного хода, имеющегося под зоной обжига.

Каналы для отсоса дымовых газов устроены за четвертой от входного конца туннеля позицией вагонеток, и потому после входа в туннель вагонетки на четырех позициях обдуваются воздухом, проходящим через неплотности песочных затворов, уплотнения между вагонетками и впускные шиберы форкамеры.

Каналы для отвода газов в боковые боровы снабжены шиберами, как в описанной выше печи завода „Пролетарий“, и размещены на протяжении от четвертой до десятой позиции вагонеток. Температура отходящих дымовых газов перед отбором их в боровы колеблется, в среднем (для разных каналов), в пределах 450—600° С. Однако, в боровых за счет разбавления дымовых газов воздухом, подсосанным из входной части туннеля, температура газов снижается до 200° С.

Зона обжига имеет 20 двойных газовых горелок. Топки размещены в шахматном порядке (так же, как и в печи завода „Пролетарий“), что обеспечивает большую глубину проникновения пламени в садку вагонетки и вихревые потоки газов, выравнивающие нагрев кирпича в разных пунктах загрузки вагонеток.

Печь работает на генераторном очищенном газе, который получается от газогенераторной станции, оборудованной газогенераторами Пинча с вращающимися колосниковыми решетками.

Газовый трубопровод устроен в надсводовом пространстве, бла-

---

<sup>1</sup> С. Нечипоренко. Туннельная печь Дресслера. „Керамика и стекло“, № 1, 1931 г.— П. П. Будников. Керамическая технология, т. II. 1933.

годаря чему газ поступает в топку подогретым. Горячий воздух подается в топку из зоны охлаждения по магистральному горизонтальному каналу, боковым распределительным ответвлениям и регулируется с помощью шиберков.

Подача газа в зоне обжига также регулируется с помощью магистрального и горелочных вентилялей.

Подача газа и воздуха под давлением (давление газа около 20—25 мм вод. ст.) и гибкое регулирование соотношения между ними позволяют получить нейтральную атмосферу и положительное давление, т. е. наиболее благоприятные условия для равномерного обжига шамота и небольшого расхода топлива.

Зона охлаждения муфельная. Первый ее участок на протяжении семи вагонеток питает топочную зону горячим воздухом с температурой в 80—90° С (при температуре обжига в 1320° С).

Остальная часть зоны охлаждения отдает горячий воздух на сторону, в сушилки.

Работа туннельной печи для обжига шамота на Часов-Ярском заводе более детально обрисовывается нижеприведенными материалами испытаний.

Часовой расход газа . . . . .	1671 м <sup>3</sup>
Теплотворная способность газа . . . . .	1113 кал/м <sup>3</sup>
Средняя температура обжига (макс.) за период испытаний . . . . .	1245° С
Средняя температура в начале зоны охлаждения . . . . .	1189° С
Температура отходящих газов в борове . . . . .	284° С
Средняя температура отбираемого на сторону воздуха . . . . .	95° С
Количество отбираемого на сторону воздуха в час . . . . .	13 900 м <sup>3</sup>
Средняя температура подогрева газа . . . . .	504° С

*Тепловой баланс часовой работы туннеля*

Приход тепла		кал	%
1. Тепло горения газа . . . . .		1 859 823	73,07
2. Теплосодержание горячего воздуха, участвующего в горении (от зоны рекуперации) . . . . .		582 186	22,87
3. Физическая теплота газа . . . . .		102 058	4,01
4. Теплосодержание загрузенного кирпича . . . . .		1 310	0,05
Всего . . . . .		2 545 377	100,00
За исключением тепла, рекуперированного в зоне охлаждения . . . . .		1 861 138	

**Расход тепла**

1. На испарение влаги гигроскопической . . . . .	29 108	1,14
2. " " " гидратной . . . . .	97 730	3,84
3. " нагрев кирпича до температуры обжига . . . . .	791 402	31,10
4. " " песка . . . . .	12 539	0,50
5. " " генераторного газа . . . . .	102 058	4,01
6. " " вторичного воздуха . . . . .	582 186	22,87

Всего полезного использованного тепла . . . . . 1 615 023 63,46

За исключением тепла, затраченного на нагрев воздуха и газа (рекуперацию) . . . . .	930 779	—
Полезное использование тепла, внесенного в печь извне (без учета тепла, рециркулирующего в печи) . . . . .	—	50

**Теплопотери**

1. Теплосодержание отходящих продуктов горения . . . . .	441 170	17,33
2. Остаточный член (лучеиспускание, передача тепла в землю и пр.) . . . . .	489 184	19,21
930 354		36,54
Потери в процентах от тепла, внесенного в печь извне . . . . .	—	50

Теплосодержание воздуха, направленного в сушилку . . . . . 190 181 9,68

При учете использования в сушилках горячего воздуха, коэффициент полезного действия печи соответственно повышается.

Принимая суточный выпуск туннеля в среднем в 16 вагонеток или 65 т (21 280 шт. норм. кирпича), расход условного топлива (расчет на газ), обычно, колеблется в пределах 10—12% к весу обожженного кирпича.

### VII. Печи большой мощности для обжига фарфоровой посуды

Для расширения Дулевского фарфорового завода Проектстеклофарфором спроектирована мощная туннельная печь, в которой использованы конструктивные элементы наиболее современных туннелей, построенных на заводах тонкой и грубой керамики.

Печь предназначена для обжига хозфарфора, смешанного ассортимента и имеет следующие размеры (рис. 173):

Длина печи . . . . .	106 м
Ширина канала . . . . .	1,85 "
Высота загрузки вагонетки . . . . .	2,1 "

В канале туннеля на протяжении 98,9 м помещается 43 вагонетки длиной по 2,3 м; остальная часть туннеля, длиной в 4 м, используется в качестве входного шлюза (вестибюль). Длина зоны подогрева с вестибюлем 33 м. Длина зоны обжига (топочной) около 23 м. Длина зоны охлаждения около 50 м.

Вагонетка, загруженная капсулами с фарфором, подается через наружную дверь в вестибюль туннеля, изолированный 2-й закрытой дверью от зоны подогрева. Когда вагонетка войдет в канал туннеля, закрывается наружная дверь вестибюля, открывается внутренняя, вестибюль сообщается с зоной подогрева, куда и подается вагонетка, с помощью гидравлического толкателя.

После прохождения вагонетки, все механизмы вестибюля возвращаются в исходное положение: закрывается внутренняя дверь, открывается наружная, поршень толкателя делает обратный ход. Печь подготовлена к пропуску следующей вагонетки. С каждым очередным проталкиванием вагонетки весь поезд передвигается на одну позицию и, таким образом, постепенно проходит зоны подогрева, обжига и охлаждения.

По мере продвижения вагонеток через туннель, фарфор подвергается воздействию печных газов и воздуха, вдуваемого в зону охлаждения.

Разрезы зоны подогрева показаны на рис. 174.

Печь отапливается генераторным торфяным газом, с теплотворной способностью около 1500 кал/м<sup>3</sup>, который подается через разветвленный трубопровод к 22-м топкам, расположенным в шахматном порядке с двух сторон печного канала.

В данной конструкции топочная зона туннеля оборудована шестью крупными топками камерного типа и 16-ю щелевыми топками.

Большие топки (рис. 175) имеют длину (глубину) 1 м, ширину 0,65 м и высоту до замка свода 0,84 м. Газ поступает в топку через горизонтальный распределительный газоход 1, вертикальный стояк 2 и боковой отвод, разветвляющийся на три ответвления 3, выходящих в топку снизу в виде щелей 180 × 20 мм.

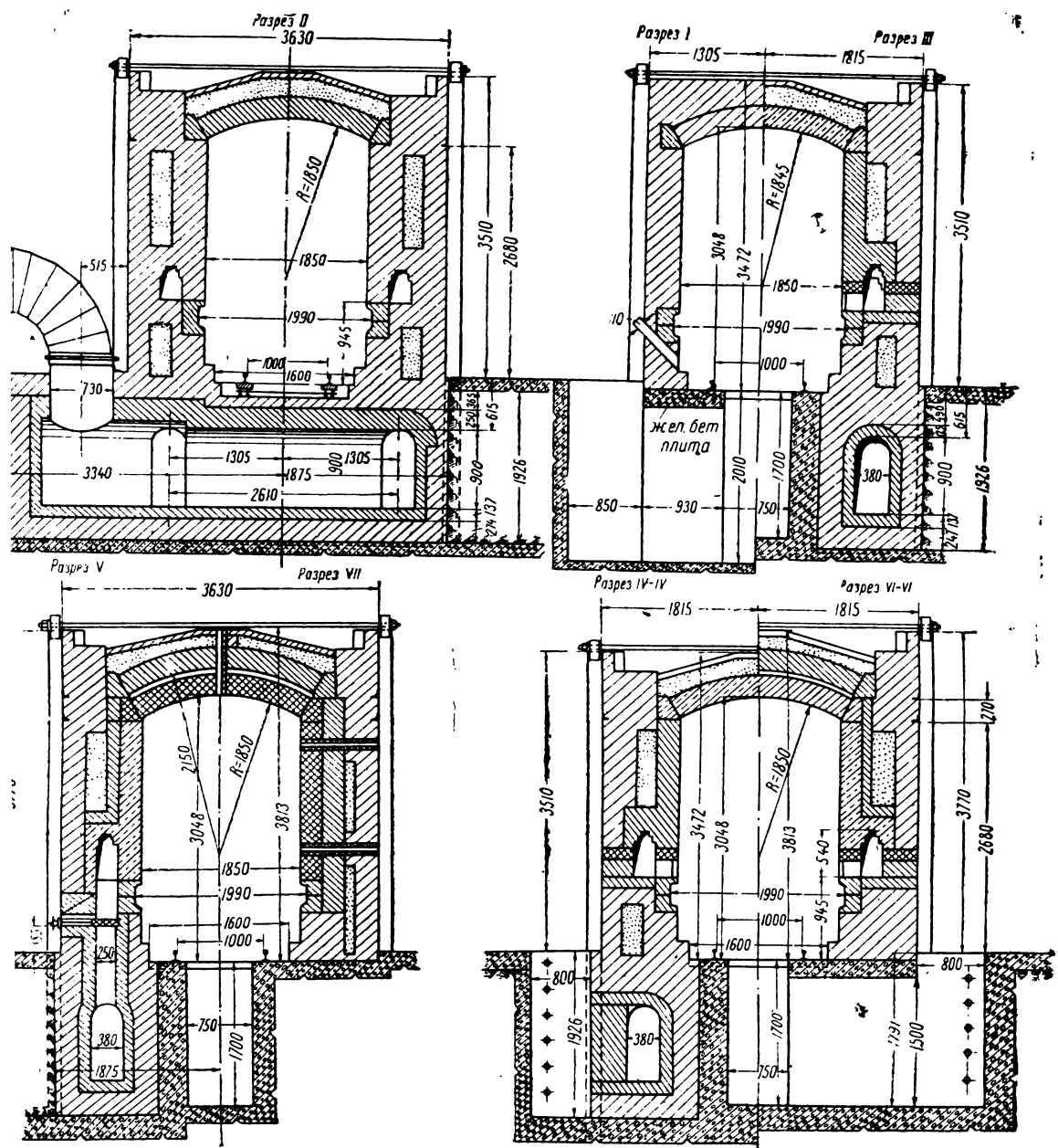


Рис. 174. Зона подогрева (разрезы).

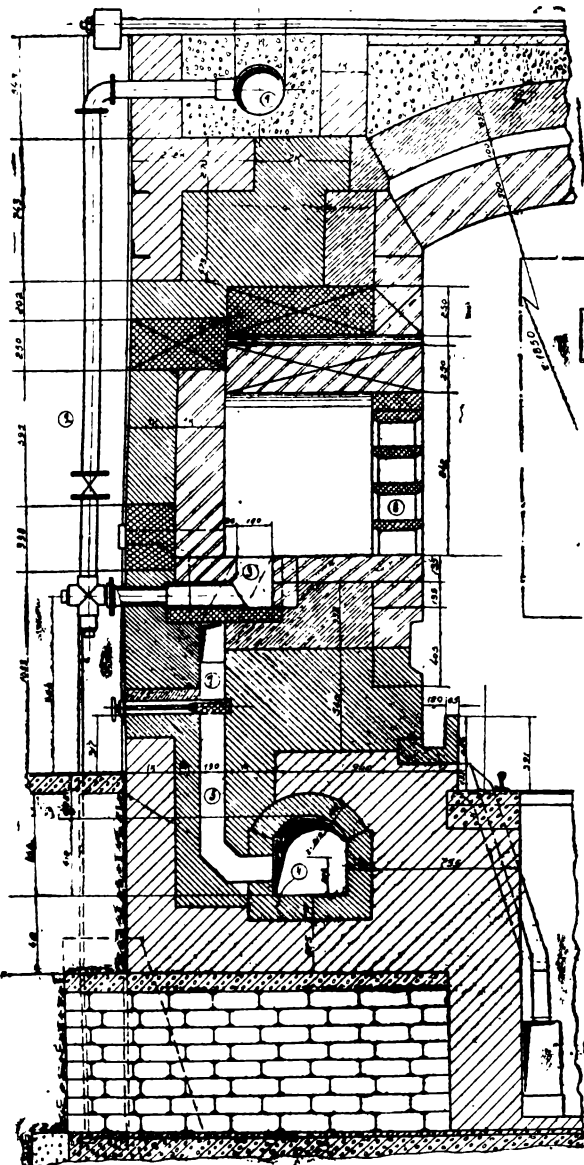
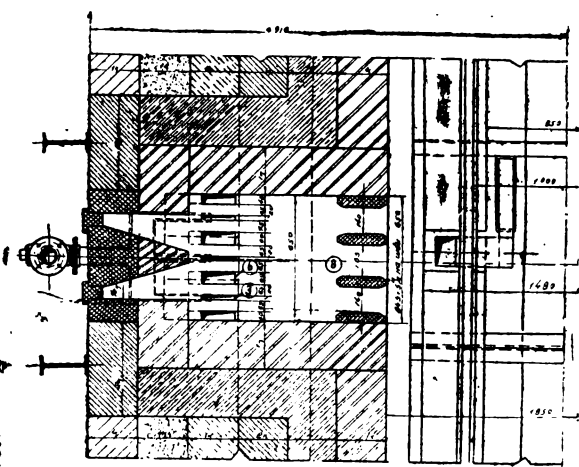
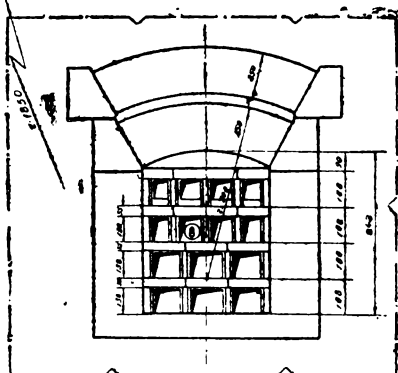


Рис. 175. Топочная зона



Горячий воздух подается в топку из зоны охлаждения с помощью специальных инжекторов, через горизонтальные распределительные каналы 4, вертикальные стояки 5 и выходящие в топку щелевые разветвления 6.

Каналы для подвода горячего воздуха подведены в топку по бокам газовых каналов. Общая площадь вылетов воздушных каналов  $360 \text{ см}^2$ .

Подача горячего воздуха регулируется шибером 7, что дает возможность регулировать в топке процесс горения и температуру. Топочные газы, во избежание деформации капселей от языков пламени с весьма высокой температурой, направляется в канал туннеля через решетку 8, выложенную из высокоогнеупорного корундового припаса. Решетка должна также способствовать лучшему перемешиванию топочных газов. В топочную зону поступают вагонетки с капселями, уже нагретыми до температуры  $900\text{—}1000^\circ \text{C}$  в зоне подогрева за счет тепла газов, отработавших в зоне обжига и проходящих через загрузку вагонеток к входной части туннеля.

Кривая температур и состав печных газов в зоне обжига может регулироваться в широких пределах путем изменения подачи газа и воздуха в отдельные топки.

В зоне подогрева данной конструкции (см. рис. 173 и 174) нет дополнительных топок, с помощью которых можно было бы удерживать кривую температур на одинаковом уровне в период так называемой „выдержки“, когда из черепка удаляются остатки гидратной воды и завершается ряд других важнейших процессов образования черепка. Единственным средством регулирования температурной кривой в зоне подогрева является устройство в кладке туннеля каналов для так называемого промежуточного отбора дымовых газов. Первые каналы для отвода газов в горизонтальные борова расположены почти рядом с топочной зоной, на расстоянии около 4,5 м, и потому можно без затруднений снизить температуру нагрева капселей на любой позиции подогревательной зоны путем отвода части печных газов в боров и уменьшения подачи тепла в определенные места подогревательной зоны. Изменить же кривую обжига в сторону более быстрого подъема температуры или удержания ее на некоторых участках на постоянном уровне, невозможно, что в смысле регулировочных возможностей является недостатком как данной, так и многих других конструкций подобных печей.

Боковые каналы для отбора дымовых газов объединены в секции, что дает возможность сократить число шиберов и упростить обслуживание печи.

Боковые газосборные борова перед вестибюлем присоединяются к общему борову и эксгаустору, с помощью которого дымовые газы удаляются в атмосферу. После прохождения через подогревательную зону и часть топочной зоны, оборудованной крупными камерными топками, обжиг фарфора в основном заканчивается.

Однако, в виду возможной неравномерности нагрева вагонеток, в туннеле устроены еще четыре небольшие щелевые топки: по одной с каждой стороны на уровне пода вагонеток и по одной под сводом туннеля. В зависимости от температуры нагрева капселей, в разных пунктах вагонетки включаются верхние или нижние топки правой и левой стороны; путем регулировки подачи газа и воздуха выравнивается температура обжига всей вагонетки.

По окончании обжига, вагонетки проходят в зону охлаждения, длина которой устанавливается в зависимости от заданной продолжительности и кривой охлаждения.

В данной конструкции зона охлаждения с выходным вестибюлем имеет длину 50,3 м и состоит из двух частей. Вагонетки сначала охлаждаются в муфельной (или рекуперативной) части зоны охлаждения, имеющей в длину 6,7 м и расположенной на расстоянии около 2 м от топочной зоны.

Капсели и фарфор на этом участке туннеля должны охлаждаться за счет отдачи тепла лучеиспусканием рекуператору из шамотных труб, установленных вдоль стен туннеля, и ребристому шамотному своду. Трубы рекуператора и свод охлаждаются, в свою очередь, холодным воздухом, который поступает из атмосферы через каналы, распределительный канал и шамотные трубы в надсводовое пространство, откуда отсасывается через два ответвления общим вентилятором. Циркуляция воздуха в шамотных трубах и в надсводовом пространстве, следовательно, и охлаждение вагонеток, регулируется шиберами на входных каналах. Дальнейшее охлаждение вагонеток производится посредством омыwania капселей потоком воздуха, подаваемого, в основном, через веерообразную трубу под свод и через стену у входных дверей туннеля. Для более быстрого охлаждения в средней части зоны и регулирования кривой охлаждения устроены шесть дополнительных боковых каналов, выходящих в туннель на уровне пода вагонеток.

Основная масса горячего воздуха (около 85%), получаемого при охлаждении вагонеток, отбирается из зоны охлаждения с помощью вентилятора через отверстие в своде и трубопровод и подается в сушилки и цеха для обогрева и вентиляции. Часть горячего воздуха, в строго регулируемых количествах, подается с помощью инжектора через специальные ниши и каналы, размещенные в стенах печи, в топку на сжигание газа. Подача горячего воздуха регулируется у каждой топки самостоятельно. Холодный воздух, с помощью которого инжектируется горячий воздух к топкам, имеет давление в пределах 700—1000 мм вод. ст. и засасывает в 4—5 раз больший объем горячего воздуха. Поэтому температура воздушной смеси, подаваемой в топку, может достигать 900—1000° С.

Воздух, отбираемый из зоны охлаждения вентилятором, разбавляется менее нагретым воздухом из рекуперативной зоны и дополнительным подсосом холодного воздуха из атмосферы.

В целях регулирования кривой охлаждения, в средней части зоны охлаждения, в стенах под сводом, устроены шесть каналов для промежуточного отбора горячего воздуха. Эти каналы размещены по длине туннеля между каналами, подающими дополнительный воздух, и присоединены к двум боковым ответвлениям главного трубопровода.

Охлаждение нижней металлической части вагонеток в зоне высоких температур предусмотрено устройством специальной приточно-вытяжной вентиляции в нижнем коридоре печи.

Тепловой расчет туннельных печей весьма сложен и базируется на заданной кривой обжига фарфора и предполагаемых температурах капселей, внутренней поверхности стен, свода и пода вагонеток.

Исходя из этих отправных данных, расчетным путем определяется поглощение тепла нагрузкой и футеровкой вагонеток и теплопотери через стены, свод и под вагонеток в окружающую среду.

В результате подсчетов расхода тепла на обжиг фарфора и ожидаемых теплопотерь, намечается предположительный тепловой баланс печи и часовой расход топлива, на основе которых производятся расчеты топок и остальных элементов печи. На стр. 314 приводятся



некоторые расчетные данные по описанной туннельной печи, сведенные в таблицу 58. Суммарный расход тепла на отдельных участках показан на основном графике.

Расход тепла намечен по основному расчетному графику:

$$Q = 2\,550\,000 \text{ кал/час.}$$

Расход топлива:

$$V = 2060 \text{ м}^3/\text{час} \text{ газа с теплотворной способностью}$$

$$Q_p = 1447 \text{ кал/м}^3.$$

### ПРОЕКТНЫЙ ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС<sup>1</sup>

#### Зона подогрева и зона обжига

##### А. Приход

	кал/час	%
1. Теплотворная способность топлива . . . . .	2 980 000	87,3
2. Физическое тепло нагретого воздуха, поступающего для горения . . .	435 000	12,7
Итого . . . . .	3 415 000	100,0

##### Б. Расход

1. Потеря тепла с отходящими газами . . . . .	840 000	24,6
2. " " от неполного сгорания (хим. недожога) . . . . .	30 600	0,9
3. Расход тепла на нагрев фарфора . . . . .	243 000	7,0
4. " " испарение влаги фарфора . . . . .	9 400	0,6
5. " " нагревание капсуля, крышек и пр. огнеупоров . . .	1 570 000	46,3
6. " " нагрев футеровки вагонеток . . . . .	382 000	11,2
7. " " нагрев металлических частей вагонеток . . . . .	22 000	0,6
8. Потеря тепла на внешнее охлаждение печи и остаточный член . . .	318 000	9,4
Итого . . . . .	3 415 000	100,0

#### Зона охлаждения

##### А. Приход

1. Теплосодержание фарфора . . . . .	208 000	9,5
2. " капсулей, крышек плит и подставок . . . . .	1 570 000	72,0
3. " платформы вагонеток . . . . .	382 000	17,5
4. " металлических частей вагонетки . . . . .	22 000	1,0
Итого . . . . .	2 182 000	100,0

##### Б. Расход

1. Потери с выходящим поездом вагонеток . . . . .	35 600	1,6
2. " от охлаждения стен, свода, канала под туннелем и остаточный член . . . . .	512 400	23,5
3. Тепло воздуха, используемого на горение . . . . .	435 000	20,0
4. " получаемого в рекуператоре и в надсводовом пространстве . . . . .	548 000	25,1
5. Тепло воздуха, непосредственно омывающего изделия и идущего на сушку . . . . .	651 000	29,8
Итого . . . . .	2 182 000	100,0

#### Тепловой баланс всей печи

##### А. Приход

Теплопроизводительность топлива . . . . .	2 980 000	—
---	-----------	---

<sup>1</sup> В настоящее время туннельная печь Дулевского завода работает с хорошими показателями на временном мазутном топливе.

Таблица 58  
НЕКОТОРЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ФАРФОРОВОЙ ПОСУДЫ (К ПРОЕКТУ РЕКОНСТРУКЦИИ ДУЛЁВСКОГО ЗАВОДА)

Показатели и расчетные данные	Участки туннеля по длине в м										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	106
1. Температура фарфора в разных точках печного канала, принятая в пресекте . . .	20	140	400	830	1080	1360	1180	610	340	200	50
2. Температура наружной поверхности капселей . . . . .	50	170	420	840	1087	1360	1130	570	310	180	40
3. Температура внутренней поверхности стен печного канала $t_{ст}$ . . . . .	40	200	440	850	1095	1360	—	540	285	165	30
4. Температура верхней поверхности пода вагонок $t_{п}$ . . . . .	20	120	400	630	1090	1360	1150	600	330	190	40
5. Температура свода печного канала $t_{св}$ . . . . .	60	220	455	860	1110	1360	муфель	—	—	175	—
Участки туннеля, начиная от входной двери в м											
	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90	90—106	
6. Теплопоглощение фарфора при часовой производительности печи 475 кг/час и продвижении поезда около 2 м/час на отдельных участках туннеля в кал—час (знак — показывает теплоотдачу) . . . . .	2 000	2 800	6 800	6 900	6 560	— 3 370	— 10 900	— 8 400	— 1 590	— 1 520	
7. Теплопоглощение капселей, шамотных крышек и плит и подставок (просфор) в кал/час . . . . .	8 130	21 360	37 800	37 000	54 500	— 47 000	— 67 100	— 24 350	— 9 150	— 8 950	
8. Теплопоглощение футеровки пода вагонок на 1 пог. м в кал/час (округленно) . . . . .	8 100	7 550	7 550	5 800	9 270	0	— 2 420	— 2 000	— 1 260	— 360	
9. Общее потребление тепла в канале на отдельных участках туннеля в кал/час . . . . .	18 240	31 710	52 150	49 700	70 330	50 370	— 85 130	— 35 850	— 18 870	— 18 600	
10. Теплопоглощение и теплоотдача металлической части вагонок в кал/час . . . . .	20	170	560	1 740	2 860	— 2 900	— 130	— 460	— 655	— 380	

## Б. Расход

1. Тепло на испарение влаги и химические реакции в фарфоре . . .	40 400	1,35
2. Теплотери с отходящими газами . . . . .	840 000	28,2
3. Потери от химического недожога (CO) . . . . .	30 600	1,03
4. Потеря с выезжающим поездом . . . . .	35 600	1,2
5. „ в окружающую среду от охлаждения . . . . .	710 400	23,83
6. Тепло воздуха, получаемого в подвагонеточном пространстве . . . . .	124 000	4,15
7. „ „ используемого для сушки и отопления . . . . .	1 199 000	40,3

Расход условного топлива 0,9 т на 1 м фарфора и, приблизительно, 0,2 т на 1 м общей загрузки вагонеток фарфором и капсулями.

Полезная затрата тепла на нагрев, или технический коэффициент полезного действия, до конечной температуры обжига фарфора и вспомогательной нагрузки вагонеток (капсулей и пр.).

$$K_T = \frac{239\,000 + 1\,570\,000 + 9\,400}{2\,980\,000} \approx 0,61.$$

Все вышеприведенные цифры являются предположительными. Более точную характеристику этой мощной туннельной печи можно будет получить лишь после детального теплотехнического обследования ее во время эксплуатации.

При дальнейшей проработке проектов туннельных печей для обжига хозфарфора были внесены существенные изменения. Второй вариант, положенный в основу конструкции, принятой к постройке на Дулевском заводе, имеет следующие отличия от вышеописанной печи.

**Зона подогрева.** В зоне подогрева при циркульном своде наиболее горячие газы проходят под сводом над загрузкой вагонеток, а нижняя часть садки нагревается слабее, что снижает пропускную способность печи, а иногда и ухудшает качество изделий.

Поэтому в данной печи циркульный свод сохранен лишь на расстоянии 2,3 м от зоны обжига, так как в этой части зоны нагрева происходит процесс догорания топочных газов. Дальше, вплоть до вестибюля зона подогрева перекрывается плоским подвесным сводом (рис. 176 и 177), состоящим из крупных шамотных камней, подвешенных на специальных чугунных балках. Чугунные балки укрепляются на поперечных балках, которые укладываются непосредственно на стены туннеля.

Каркас для стяжки стен зоны подогрева при плоском подвесном перекрытии становится ненужным, так как в этом случае отпадает распор стен, неизбежный при циркульных сводах.

Ввиду невысоких температур в зоне подогрева, подвесной потолок зоны засыпается изоляционным слоем инфузорной земли. Толщину изоляционного слоя надлежит проверять в эксплуатации, во избежание перегрева металлических подвесок.

Отбор топочных газов из зоны подогрева производится, как и в ранее описанном варианте, через боковые борова, проложенные в стенах и соединяющиеся отверстиями с печным каналом.

Эти отверстия отсутствуют лишь на шестиметровом участке зоны подогрева, смежном с зоной обжига, таким образом, почти вся зона подогрева имеет регулируемый отбор печных газов.

**Зона обжига.** Зона обжига во втором варианте (рис. 178 и 179) имеет ту же длину 23 м, что и в описанной выше печи, и рассчитана на 10 вагонеток. Печь спроектирована для отопления генераторным торфяным газом, однако, на период пуска (до окончания постройки газогенераторной станции) предусмотрено отопление мазутом. Основные топки размещаются против разрывов между садкой смежных вагонеток по 10 топков с каждой стороны туннеля.

Кроме того, устанавливается 12 щелевых топок, по 6 с каждой стороны, подающих пламя между подставками под капсулы, и две топки за последними горелками для разжига печи. В данной печи запроектированы газовые горелки инжекционного типа, которые, благодаря большому скоростному напору, должны обеспечить подачу пламени в середину садки капсул.

В горелки может подаваться горячий воздух из зоны подогрева и холодный из атмосферы, в соответствии с регулировкой работы топок.

**Зона охлаждения.** Охлаждение капсул с обожженными изделиями производится, главным образом, путем непосредственного омывания их воздухом.

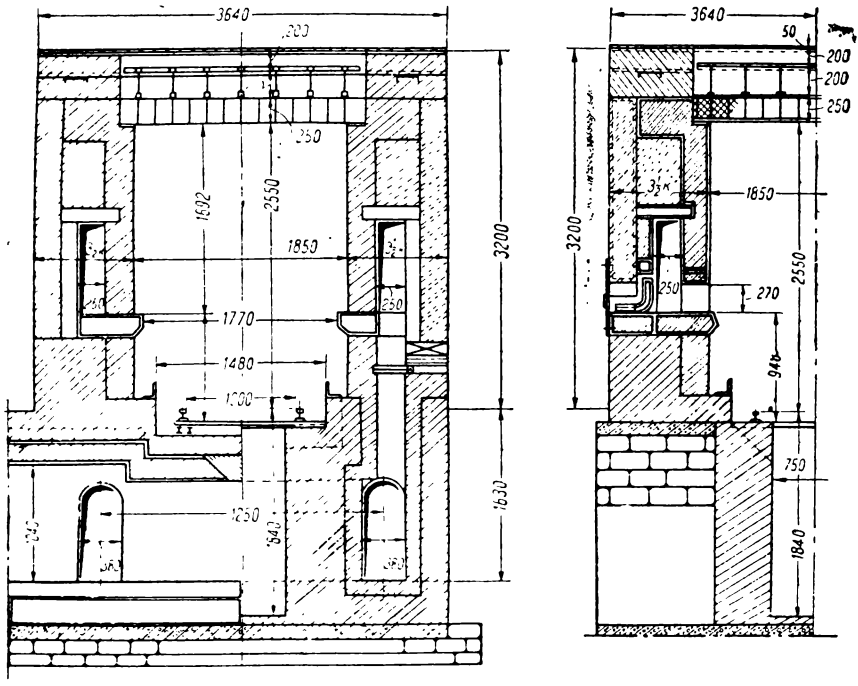


Рис. 177. Зона подогрева (поперечный разрез).

Лишь на незначительном расстоянии (около 3,6 м) рядом с зоной обжига сохранен участок рекуперативного охлаждения. В других конструкциях печей для обжига фарфора рекуперативное охлаждение упраздняется целиком.

Воздух в зону охлаждения подается под давлением с помощью вентилятора, установленного на перекрытии выходного вестибюля (рис. 180 и 181). По условиям охлаждения и конструктивным особенностям зона охлаждения подразделяется на четыре участка.

Первый участок (начиная от выходного вестибюля), длиной около 20 м имеет циркульный свод, облегчающий циркуляцию воздуха, подаваемого к зоне обжига, и более равномерное остывание верхних и нижних рядов капсул.

Второй участок зоны охлаждения, длиной около 9 м, должен обеспечить в интервале 500—700° С замедленное охлаждение около 30° С в час, если это потребуется по технологическим условиям.

Поэтому на втором участке зоны охлаждения устраивается вто-

рой свод, и часть воздуха направляется помимо садки вагонеток через межсводовое пространство. Таким образом, воздухообмен в садке капсулей уменьшается и скорость охлаждения снижается.

Для регулирования скоростей и количеств воздуха, проходящего через садку и межсводовое пространство, в последнее через

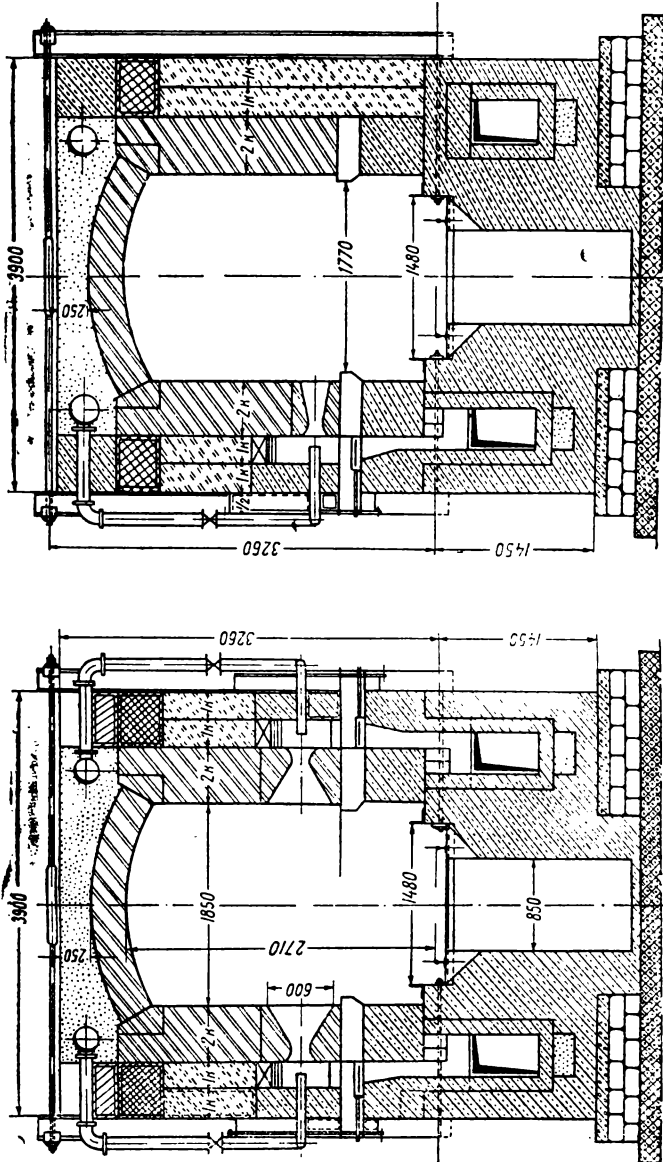


Рис. 179. Зона обжига (поперечные разрезы).

сопла подается под высоким давлением холодный воздух, с помощью которого инжeksiруется горячий воздух и, таким образом, увеличивается скорость последнего в межсводовом пространстве, а в садке вагонеток соответственно уменьшается воздухообмен и скорость охлаждения.

На третьем участке 'зоны' охлаждения, имеющем длину около

6 м, фарфор и капсулы допускают более быстрое охлаждение (около  $120^{\circ}\text{C}$  в час, в зависимости от термической стойкости капсул).

Большая разница температур охлаждаемых капсул и омывающего их воздуха обеспечивает быструю теплоотдачу.

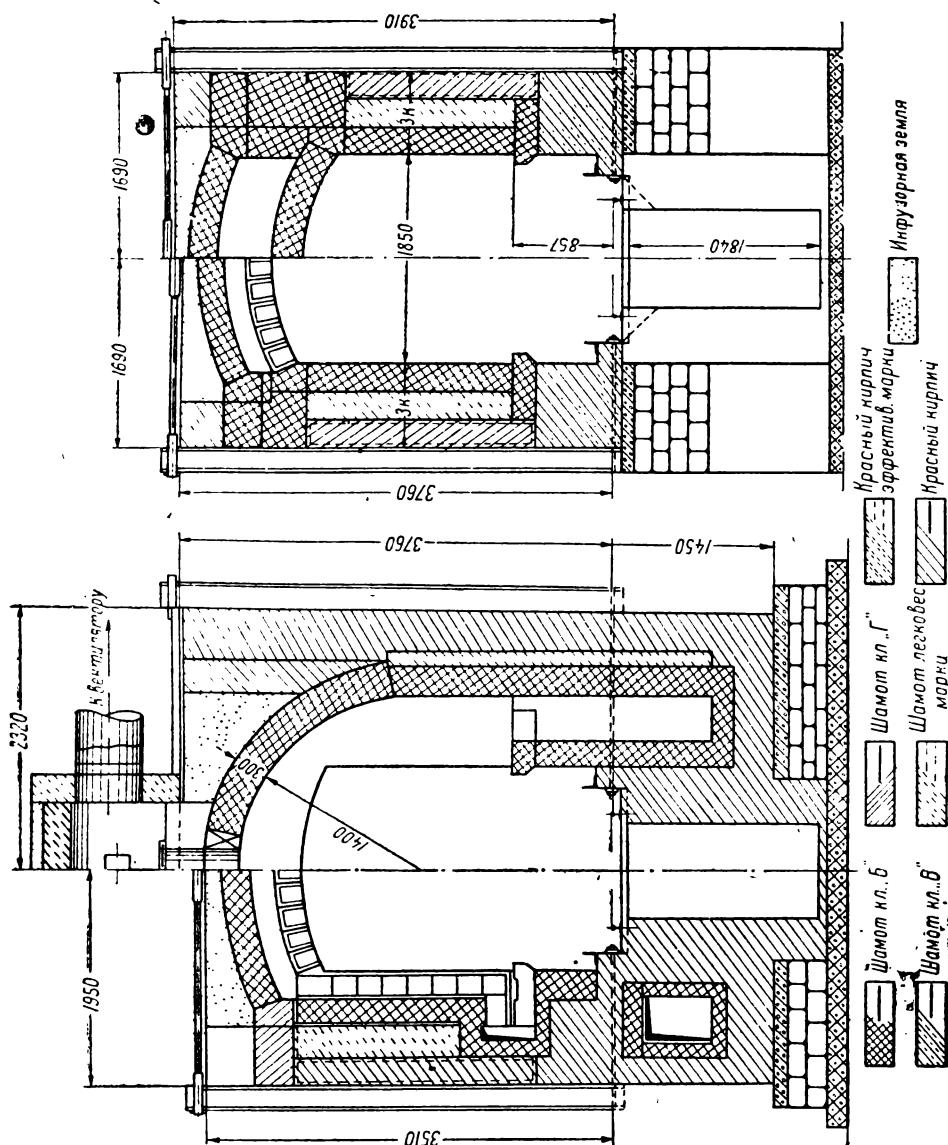


Рис. 181. Зона охлаждения (поперечный разрез).

Учитывая возможность более форсированного охлаждения, на третьем участке может применяться дополнительное охлаждение ребристого свода, путем подачи через межсводовое пространство холодного воздуха по отдельным трубам.

В расширяющейся части туннеля, на расстоянии около 5 м от крайней топки, горячий воздух перемешивается с холодным воздухом, подсосываемым из атмосферы, и отбирается вентилятором для подачи в сушилки или для отопления помещений.

Четвертый участок зоны охлаждения, граничащий с топочной зоной, является, до некоторой степени, буфером и должен свести до минимума колебание давлений в зоне обжига и обеспечить независимость ее работы от изменений давления в зоне охлаждения.

В силу этих условий, на этом участке газообмен сведен до минимума и охлаждение происходит лишь путем теплоотдачи излучением. В данной конструкции стены выполнены в виде рекуператора из шамотных труб и охлаждаются вместе с ребристым сводом холодным воздухом. В некоторых вариантах туннельных печей рекуператоры не применяются, ввиду их недостаточной долговечности. Горячий воздух из зоны охлаждения частично используется для сжигания топлива, как в топках, так и в печном канале зоны обжига.

Описанные выше конструктивные варианты крупных туннельных печей для обжига хозяйственного фарфора проверяются в работе и в ближайшие годы будет собран материал для разработки типовых наиболее экономичных в эксплуатации туннельных печей.

К туннельным печам для обжига хозфарфора предъявляются высокие требования в смысле точного выполнения температурного и газового режима, обеспечивающего белизну, прозрачность и равномерный обжиг продукции (без пережога).

Поэтому изучение туннельных печей и создание типовых конструкций является первоочередной задачей при освоении их в фарфоровой промышленности.

### **VIII. Муфельные туннельные печи типа Дресслер**

В муфельных печах обжигаемые изделия не соприкасаются непосредственно с топочными газами, а нагреваются путем передачи тепла изделиям через ограждение из огнеупорных плит-муфель. Вследствие невысокой теплопроводности огнеупорных материалов, применяемых для сооружения муфельных стен и коробок, процесс нагревания до заданной температуры протекает медленнее, чем в печах прямого действия и с меньшим коэффициентом теплоиспользования. Поэтому муфельный обжиг получил распространение лишь в тех отраслях керамической промышленности, где при обжиге изделий прямым пламенем могло бы получиться загрязнение глазури летучей золой и ряд других дефектов.

Наиболее простой формой муфельного обжига является обжиг в огнеупорных шамотных коробах-капселях, устанавливаемых в печной камере и на вагонетки туннельных печей в столбы с определенными интервалами для прохождения топочных газов. Хотя шамотные капсели от действия высоких температур довольно быстро разрушаются, однако, их регулярная замена по мере выхода из строя не снижает производительности печей.

По другому варианту изделия обжигаются в специально устроенных муфельных печных камерах из огнеупорных плит, омываемых снаружи поточными газами. Стенки муфельных камер выполняются более толстыми, чем шамотные капсели, так как быстрое разрушение тонких муфельных плит повело бы к частым остановкам печей на ремонт и довольно крупным расходам. Однако при толстостенных муфелях для получения внутри камеры высоких температур (1300—1350° С) потребовалось бы нагревать ее снаружи топочными газами с температурой в 1800—2000° С, что вызвало бы необходимость в особо устойчивых огнеупорах для футеровки печей и привело бы к большим расходам топлива.

В силу отмеченных обстоятельств, муфельные печи не получили большого распространения и применяются лишь для обжига крупных изделий тонкой керамики, например санитарного фаянса до температуры в 1100—1250°С, а также в эмалировочной промышленности и для закрепления красок после декорирования фарфора и фаянса. Однако, применение муфельных печей в производстве крупных изделий (умывальные столы и т. п.), для обжига которых в печах с прямым пламенем потребовались бы весьма объемистые и неустойчивые в обжиге капсулы, стало рентабельным лишь после появления муфельных туннельных печей специальной конструкции системы Дресслера.

Ниже приводится описание одной мощной современной муфельной печи составленное по литературным и проектным данным.<sup>1</sup>

Муфельная туннельная печь типа Дресслера, как и остальные туннельные печи, имеет зоны подогрева, топочную и охлаждения обожженных изделий (рис. 182). Общая длина печи — 131 м. Длина зоны подогрева около 30 м, зоны обжига (горения) около 18 м, зоны охлаждения — 83 м.

Наибольшая ширина печи (в зоне горения) около 5 м, а наибольшая высота в зоне охлаждения около 4 м от уровня пола горнового цеха. Габаритная ширина внутри печного канала 1340 мм, а используемая для загрузки высота печного канала составляет 1,9 м, из коих 0,15 м занято подставками под огнеупорный каркас вагонетки, на котором устанавливаются изделия. Устройство нагревательной зоны туннельной печей Дресслера весьма оригинально и является их основным отличием от других печей с прямым, муфельным и полумуфельным обогранием.

Основными конструктивными элементами зоны горения и зоны подогрева являются два канала, выложенные из пустотелых трубчатых элементов.

Как видно из рис. 183 (разрезы II и III), четыре трубы прямоугольного сечения складываются в форме трапеции и сообщаются через отверстия с печным каналом и между собою.

Расположение отверстий и монтаж труб муфельных элементов проектируется с таким расчетом, чтобы менее нагретый воздух из нижней части печного канала проходил по направлению стрелки через поперечную горизонтальную трубу, подогреваясь подымался бы через вертикальные трубы и через верхнюю наклонную трубу выходил под свод печного канала.

В печном канале горячий воздух отдает часть тепла обжигаемой продукции и, по мере охлаждения, опускается книзу вагонеток, затем опять поступает в нижние муфельные трубы, подогревается за счет топочных газов и непрерывно циркулирует в показанном на чертеже направлении.

Нагревание муфельных труб и циркулирующего в них воздуха производится путем сжигания газообразного или жидкого топлива в двух горизонтальных каналах, ограниченных снизу, сверху и с боков муфельными трубами, уложенными перпендикулярно к направлению потока топочных газов. Отдельные трапециевидные секции муфельных труб должны изготовляться из специального карборундового шамота, имеющего высокую огнеупорность и теплопроводность. Трубчатые элементы должны иметь точные размеры, герметичность стыков между отдельными трубами в каждом циркуляцион-

---

<sup>1</sup> Цифровые данные и чертежи заимствованы из современного проекта муфельных печей, составленного печной группой Проектстеклофарфора.



ном элементе муфеля и между отдельными элементами. При неплотном соединении отдельных секций муфеля или частом их разрушении, в работе нарушается нормальная непрерывная циркуляция горячего воздуха внутри печного канала, часть горячего воздуха неизбежно просачивается в топочные горизонтальные каналы и вместе с дымовыми газами удаляется в атмосферу. Взамен горячего воздуха, удаляемого через неплотности муфеля, в печной канал поступает свежий воздух из атмосферы, что замедляет нагревание и увеличивает расход топлива.

Точность изготовления, длительность службы и теплопроводность муфельных элементов, в основном, определяют работу печи типа Дресслера. Поэтому производство таких высококачественных элементов определяет перспективы распространения муфельных туннельных печей. Муфельные элементы Дресслера в точках подачи газа или мазута в топочный канал имеют специальное устройство и сквозные каналы для подачи топлива и горячего воздуха из зоны охлаждения (см. рис. 183, разр. III).

Шамотно-карборундовые муфельные секции установлены в данной печи на протяжении 47,5 м, из коих около 18 м работают в зоне горения, а остальные — в зоне подогрева. По мере продвижения

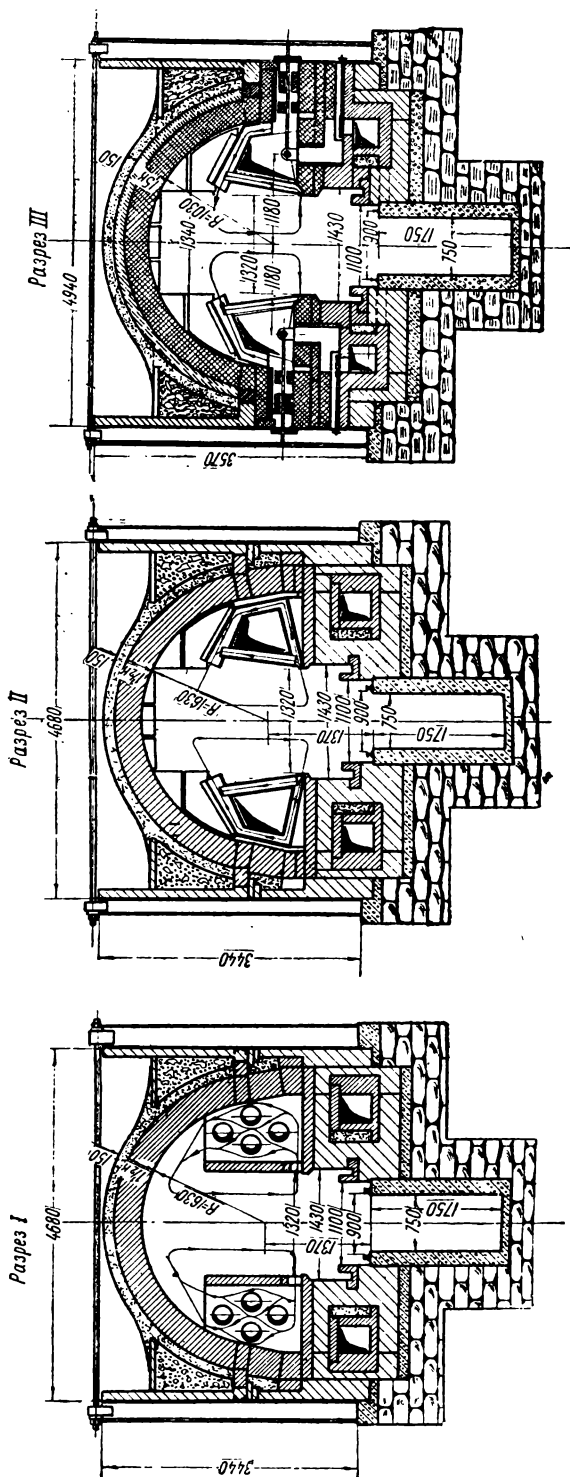


рис. 183. Зона подогрева (I, II) и зона обжига (III).

топочных газов к входной части туннеля, их температура снижается и в дальнейшем подогрев продукции можно осуществить через рекуператоры из чугунных или стальных труб. Последние обладают более высоким коэффициентом теплопередачи, чем шамотно-карборундовые, и не имеют такого большого количества швов, что уменьшает засосы воздуха. Длина металлического рекуператора — около 13 м. На расстоянии 20 м от входа в туннель топочные газы из канала шамотно-карборундового муфеля поступают через коллектор в металлический рекуператор, состоящий из четырех чугунных труб, диаметром в 250 мм, расположенных в шахматном порядке и отделяемых от загруженных вагонеток не доходящей до свода шахматной стеной в  $\frac{1}{2}$  кирпича, имеющей внизу ряд отверстий, выходящих в печной канал (см. рис. 183, разрез I). Стенка устраивается с целью направить циркуляцию горячего воздуха и возможно равномернее прогреть нагрузку вагонеток.

Подогреваемый между чугунными трубами воздух подымается под свод туннеля и, прогревая изделия, проходит книзу, через загрузку вагонеток. По мере охлаждения более тяжелый воздух опускается вниз, через отверстия в стенке (см. рис. 183, разрез I) проходит в металлический рекуператор и вытесняет горячий и более легкий воздух кверху.

Как в шамотно-карборундовых муфельных элементах, так и в металлическом рекуператоре, принцип и направление циркуляции остаются одинаковыми. Побудителем движения воздуха является естественный гидростатический напор, обусловленный разностью температур воздуха между изделиями и в нагревательных устройствах, тогда как в печах прямого действия циркуляция горячих газов между изделиями обусловлена интенсивным обменом топочных газов, омывающих продукцию под влиянием тяги вентилятора или дымовой трубы. Слабая циркуляция горячего воздуха в печном канале и воздействие лучистой теплоты раскаленных муфельных элементов лишь на крайние изделия приводит к неравномерному прогреву изделий: внутри вагонетки нагрев отстает от нагрева вблизи стен муфеля, и потому печи этого типа не строятся с широким каналом. В данном случае принята близкая к пределу ширина в 1,34 м.

Охлаждение обожженных изделий в печах типа Дресслера также производится муфельным способом. Зона охлаждения подразделяется на три части.

1 Первый участок зоны, примыкающий к зоне горения, оборудован рекуператором из прямоугольных шамотных труб. Свод устроен из коробчатого шамота, охлаждаемого воздухом, циркулирующим в надсводовом канале. Этот участок зоны охлаждения имеет в длину 17 м.

Устройство рекуператора из шамотных труб для охлаждения изделий в муфельной туннельной печи принципиально ничем не отличается от конструкции такого же рекуператора в описанной выше туннельной печи Дресслера прямого действия и показано на рис. 184 (разрез IV).

Дальше вагонетки поступают во второй участок зоны охлаждения, оборудованный воздушным металлическим рекуператором, сходным с рекуператором зоны подогрева, но работающим на охлаждение.

Через газовые 4-дюймовые трубы нагнетается (вместо топочных газов) охлаждающий трубы воздух из помещений.

Устройство металлического рекуператора и направление цирку-

ляции воздуха в печном канале показано на рис. 184 (разрез V). Длина металлического рекуператора — 14 м.

Третий участок зоны охлаждения является простейшим муфелем из волнистого листового железа (см. рис. 184, разрез VI), имеет в длину 30 м и подразделяется на две, примерно, равные секции с самостоятельной регулировкой воздухообмена и скорости охлаждения.

Циркуляция воздуха в шамотном и металлическом рекуператорах и скорость охлаждения продукции на обслуживаемых ими участках зоны регулируются путем перекрытия шиберами трубопроводов, с помощью которых эти устройства присоединяются к общему магистральному трубопроводу, показанному на рис. 182 в плане и разрезе.

Из приведенного краткого описания работы отдельных зон муфельной печи видно, что основным и наиболее существенным

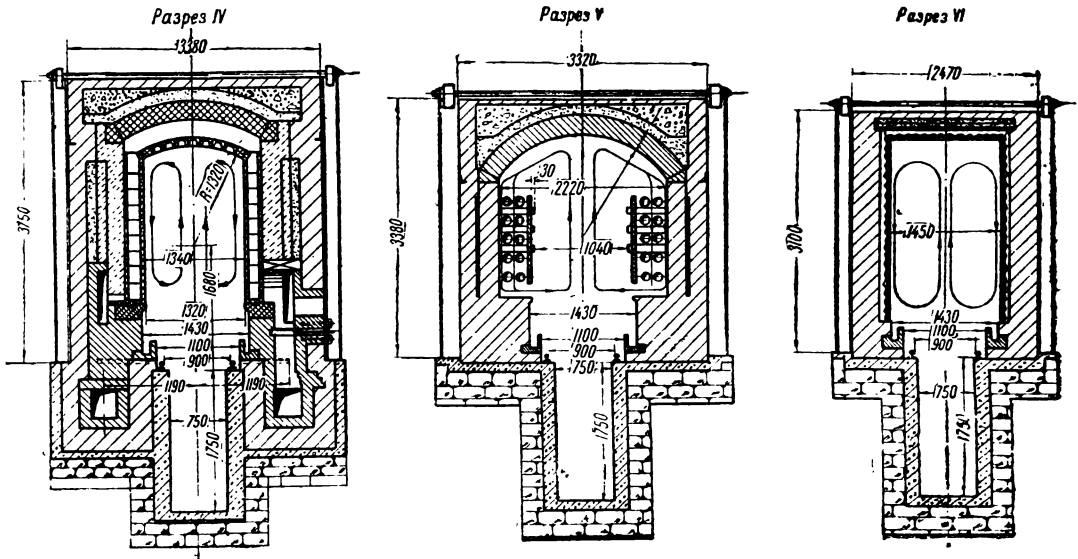


Рис. 184. Зона охлаждения (разрезы IV, V и VI).

фактором ее эксплуатации является хорошо продуманная и надежная конструкция муфельных и рекуперативных элементов и правильная, по возможности интенсивная, циркуляция воздуха — единственного теплоносителя в печном канале. Помимо разницы температур в отдельных участках печного канала, являющейся в данном случае единственным побудителем циркуляции, весьма большое значение для работы муфельных печей имеет сопротивление, оказываемое нисходящим и восходящим воздушным потокам загрузкой вагонеток.

Поэтому разработка наиболее эффективной и обтекаемой конструкции шамотного каркаса для укладки изделий на вагонетках, размещение изделий и установление оптимальных проходов между ними является весьма серьезной задачей.

На рис. 185 показана конструкция шамотного каркаса вагонетки и один из вариантов укладки санфаянса. Наибольшие затруднения встречаются вследствие перекашивания каркаса по ходу вагонеток. Однако сделать каркас более жестким по оси туннеля путем установки плит не представляется возможным, так как последние помешали бы поперечной циркуляции воздуха.

В целях устойчивости, посреди вагонетки для поддержки плит установлены три пустотелых тумбы, а боковые стойки имеют коробчатый и кольцевой профиль. Конструкция каркаса тесно связана с огнеупорностью и устойчивостью огнеупорного припаса на сжатие и, главным образом, на изгиб при высоких температурах.

Здесь открывается широкое поле деятельности для совместной работы конструкторов-теплотехников и керамиков.

В СССР на керамических заводах нет еще туннельных муфель-

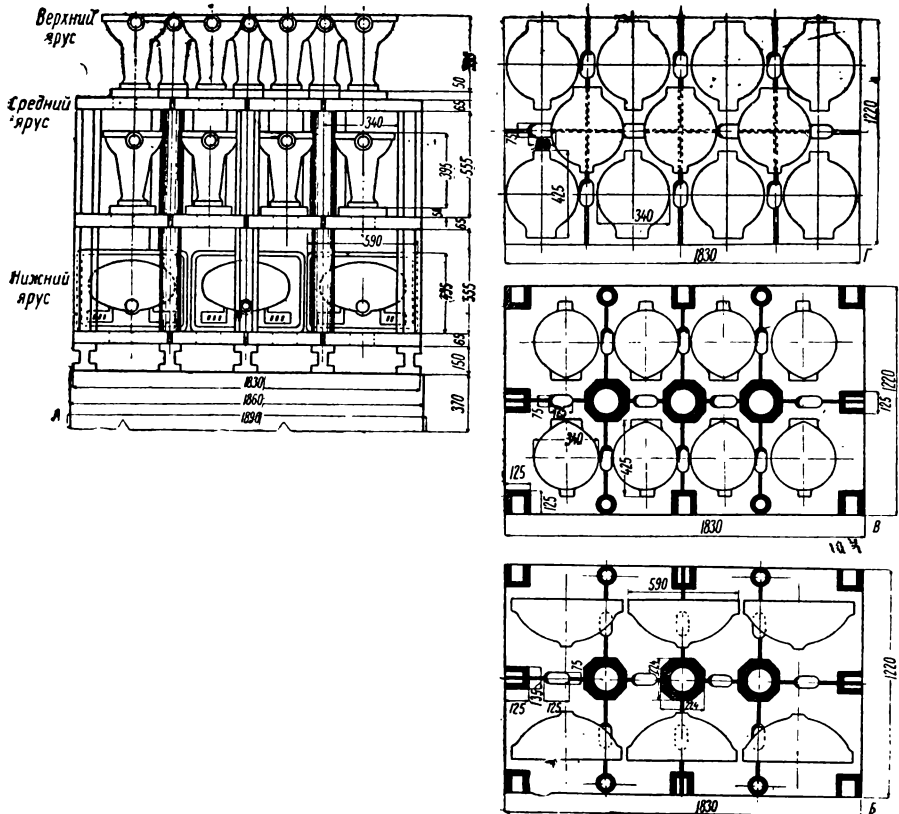


Рис. 185. Ставки вагонетки санитарделиями.

А — вид сбоку; планы: Б — нижнего яруса, В — среднего яруса и Г — верхнего яруса.

ных печей типа Дресслера и потому в литературе не накопилось эксплуатационных данных о их работе.

Ниже приводятся некоторые цифровые характеристики туннельной муфельной печи для политого обжига фаянса и показатели, приведенные в проекте на основании данных о печах зарубежных заводов и произведенных расчетов.

Максимальная температура обжига . . . . .	1200° С
Продолжительность обжига и охлаждения около . . . . .	60 час.
Выпуск вагонеток в сутки около . . . . .	35 шт.
Количество вагонеток в печи . . . . .	69
Вес загрузки 1 вагонетки фаянсом, в зависимости от ассортимента около . . . . .	225—300 кг
Кубатура ставки на вагонетке $1,83 \times 1,22 \times 1,93$ . . . . .	4,31 м <sup>3</sup>
Вес (каркаса) на вагонетке $1,83 \times 1,22 \times 1,93$ до . . . . .	340 кг

Годовой выпуск сanfаянса смешанного ассортимента из одной печи при 330 рабочих днях . . . . .	3300 т
Выпуск в час . . . . .	412 кг
Проектируемый расход коксового газа с теплотворной способностью 3900 кал . . . . .	573 м <sup>3</sup> /час

*Данные сводного теплового баланса работы печи*

**А. Приход**

	кал/час	%
1. Теплотворная способность топлива . . . . .	2 235 000	81,34
2. Физическое тепло топлива, поезда вагонеток, паразитного воздуха и воздуха, поступающего в зону охлаждения . . . . .	94 500	3,44
3. Тепло нагреваемого воздуха, поступающего на горение . . . . .	418 000	15,22

**Б. Расход**

1. Тепло поезда, выходящего из зоны охлаждения . . . . .	60 000	2,18
2. Потери тепла через стены, свод и под . . . . .	565 000	20,55
3. " с уходящими газами . . . . .	402 500	14,65
4. Неучтенные потери (остаточный член) . . . . .	380 000	13,80
5. Тепло горячего воздуха, используемого для сушилок . . . . .	917 000	33,40
6. На испарение влаги глазури . . . . .	5 000	0,18
7. На нагрев воздуха для горения (тепло возвращается обратно в печь)	418 000	15,24
	<u>2 747 500</u>	<u>100,0</u>

Ожидаемый экономический коэффициент полезного действия:

отношение расхода тепла на нагревание изделий до 1200° С к теплотворной способности топлива . . . . .	0,08
Технический коэффициент полезного действия:	
отношение расхода тепла на нагревание всей загрузки вагонетки (изделий, ша- мотных плит, стоек) до температуры обжига к теплотворной способности топлива . . . . .	0,60

## ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

### МАЛЫЕ ТУННЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Размеры туннельных печей и производительность их колеблются в весьма широких пределах. В разных отраслях керамической промышленности работают туннельные печи с длиной канала до 150 м и выше при ширине его около 2 м. В туннельных печах Отто ширина канала достигает 3 м. Наряду с крупными, строятся малые туннельные печи с длиной канала, не превышающей в отдельных случаях 10—15 м.

Сечение канала в малых печах также колеблется в весьма широких пределах. Например, в туннельной печи для обжига авто-свечных изоляторов сечение канала рассчитано на пропуск свечей в один ряд, и вагонетка имеет в ширину всего лишь 6 см, а в туннельных печах для обжига декорированных фарфоровых изделий достигает 0,8 м.

Границу, отделяющую малые туннельные печи от печей средних и крупных размеров, установить трудно.

Малыми можно считать туннельные печи с длиной канала меньше 50 м и сечением до 1 м<sup>2</sup>. Эти печи используются на тех керамических заводах, где по объему или условиям производства большие туннельные печи не могут применяться, например, в небольших помещениях реконструируемых или расширяемых цехов.

Некоторые виды керамической продукции, в частности изоляторы из тальковых масс, имеющих весьма небольшой интервал между температурами спекания и плавления, до сих пор не удавалось обжигать в туннельных печах с большим сечением канала. Поэтому, независимо от объема производства, здесь можно пользоваться лишь малыми туннельными печами, чтобы разница температуры в отдельных точках вагонетки не превышала 10—15 °С.

Малые туннельные печи строятся как с непосредственным (прямым) действием пламени, так и муфельного типа; последние получили весьма широкое применение для закрепления красок на фарфоре и фаянсе. С уменьшением размеров канала, производительность туннельных печей резко падает.

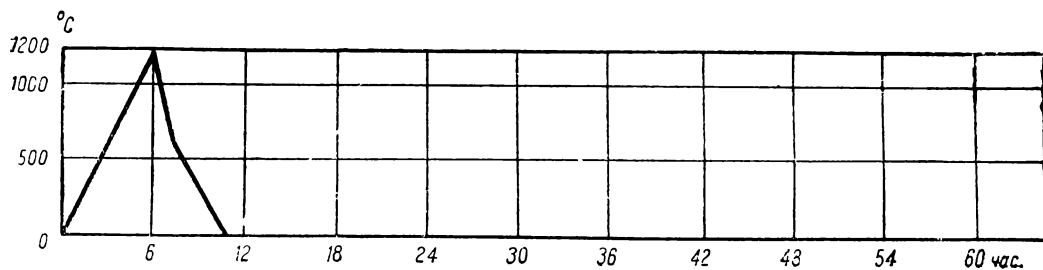
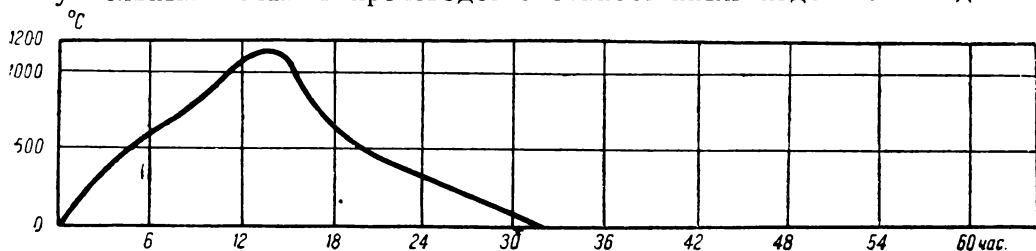
При сохранении заданной продолжительности обжига, выпуск печи сокращается прямо пропорционально уменьшению длины канала и площади его сечения.

Однако часто встречаются отступления от этой простой зависимости.

Продолжительность обжига, устанавливаемая для крупных печей, складывается из двух моментов: 1) времени, минимально необходимого для завершения всех технологических процессов, протекающих при высоких температурах; 2) дополнительного времени, потребного для выравнивания температур по всему сечению печной камеры или вагонетки.

По мере уменьшения ширины и высоты загрузки вагонетки, затяжка обжига для выравнивания температур также сокращается, и в пределе, когда на вагонетке устанавливаются изделия по высоте и ширине в один ряд, вторая составляющая времени, затрачиваемого на обжиг, практически уменьшается до нуля.

Повышение скорости обжига дает наибольший эффект в малых туннельных печах в производстве тонкостенных изделий. По дан-



Б

Рис. 186. Продолжительность обжига в печи периодического действия (А) и в туннельной печи (Б) при небольшом сечении канала.

ным Х. Виллаха, <sup>1</sup> бисквитный обжиг каменного товара в малой туннельной печи шириною в 0,55 м требует всего 10 час. против 30 час., необходимых при обжиге в туннельной печи шириною в 1,5 м.

Продолжительность обжига массивных и крупных изделий, например огнеупорного кирпича, по причинам технологического порядка нельзя существенно сократить, даже при минимальных сечениях туннеля, до пределов, вполне допустимых при обжиге тонкостенных мелких изделий. Поэтому здесь сокращение длины и пропускной способности туннеля не может компенсироваться сокращением продолжительности обжига.

Приведенные сопоставления позволяют сделать вывод о предпочтительности использования малых туннельных печей для обжига таких керамических изделий, которые по своим размерам и физико-химическим свойствам масс допускают кратковременный обжиг и охлаждение.

<sup>1</sup> Н. Willach. „Keramische Rundschau“, № 39, 1930.

Преимущества туннельных печей с небольшим сечением канала в смысле равномерности обжига продукции особенно ярко выступают в тех случаях, когда по техно-экономическим соображениям приходится применять обжиг в муфельных или электрических печах. В таких печах передача тепла изделиям от раскаленного экрана (муфельной стенки или электронагревательного прибора) осуществляется, главным образом, лучеиспусканием. Поэтому при увеличении ширины вагонетки изделия, находящиеся в средней ее части и не подвергающиеся непосредственному воздействию лучистой теплоты экрана, отстают в нагреве. Для выравнивания температур потребовалось бы весьма много времени. На рис. 186 приведены кривые, приблизительно иллюстрирующие зависимость продолжительности обжига от ширины канала туннельной печи.

Необходимо учесть, что приведенные диаграммы приблизительно характеризуют соотношение между продолжительностью обжига и шириной канала лишь в том случае, когда изделия по своим технологическим свойствам могут без ущерба (трещин, деформаций и тому подобных дефектов) перенести быстрый нагрев, показанный для печи малого сечения. К таким изделиям следует отнести тонкостенную фарфоровую и фаянсовую посуду, предварительно обожженную на бисквит и довольно легко переносящую быстрый нагрев во втором полите обжиге.

Канал в малых туннельных печах в плане часто имеет кольцеобразную и П-образную форму, обусловленную недостаточной длиной зданий, не позволяющей вписать в его габариты печь в развернутом виде. Изогнутая форма канала имеет, наряду с некоторыми преимуществами, и много недостатков, отмечаемых в приведенных ниже описаниях малых туннельных печей.

## **I. Муфельные туннельные печи для закрепления красок на фарфоре и фаянсе**

Закрепление красок на фарфоре и фаянсе производится путем нагрева изделий с нанесенными на них рисунками до температуры порядка 700—900 °С, в зависимости от легкоплавкости используемых красок.

Обжиг раскрашенных изделий производится весьма быстро, в течение 2-3 час., в зависимости лишь от устойчивости изделий к резким переменам температуры при нагреве и охлаждении.

К обжигу раскрашенных изделий предъявляются довольно жесткие требования.

Для равномерного оплавления красок и получения единообразной их яркости и блеска нагрев ящика (или вагонетки) с изделиями должен производиться равномерно во всех точках. Даже небольшая разница в температурах нагрева изделий, расположенных в верхней и нижней частях вагонетки, учитывается в обжиге, и ее вредные последствия устраняются укладкой наверху вагонеток изделий, раскрашенных более тугоплавкими красками.

Атмосфера, в которой закрепляются краски, должна быть окислительной, гарантирующей от восстановления и потемнения красок.

До последнего времени эти требования удовлетворяли лишь обжиг в муфельных печах — туннельных и периодического действия. Изделия в этом случае отделяются от непосредственного действия пламени шамотными плитами, что исключает резкие колебания температуры от ударного действия языков пламени и обеспечивает



постоянную окислительную атмосферу внутри муфеля даже при резких колебаниях ее от окислительной до восстановительной среды.

При использовании простых топок, дающих резкие изменения температуры и газовой среды в период подброски топлива и прогара, невозможно получить доброкачественный обжиг красок прямым обогреванием топочными газами. До появления печей с газовыми топками и электрическим обогреванием надежный обжиг раскрашенного фарфора и фаянса можно было получить лишь в муфельных печах.

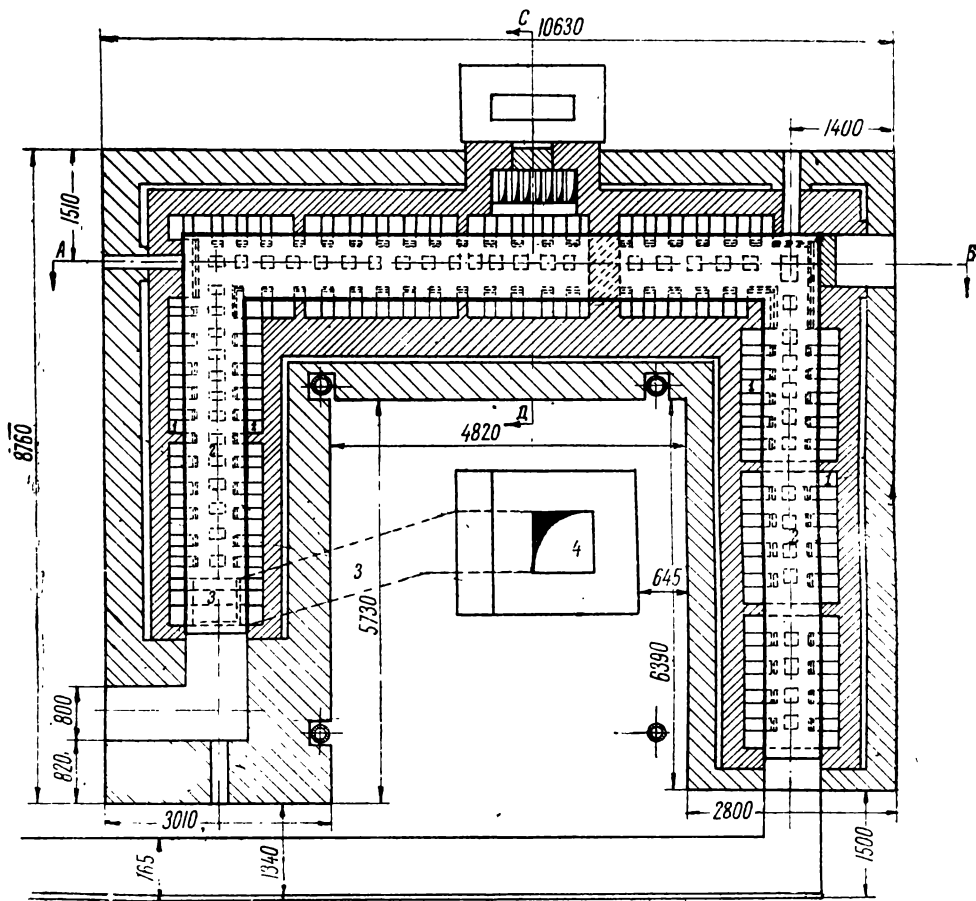


Рис. 187. Муфельная П-образная печь (план).

На заводах СССР и за границей получили широкое распространение два основных типа муфельных туннельных печей (иногда называемых „скороспелками“): прямые и с П-образным каналом.

Основным отличием прямых муфельных туннелей от П-образных является способ загрузки печного канала изделиями. В первой конструкции стальные или чугунные ящики при подаче в канал скрепляются шарнирными болтами, и весь поезд ящиков протаскивается через туннель электрифицированной лебедкой, установленной у выходного конца туннеля. В туннелях с каналом, изогнутым в форме буквы П, сопротивление трения ящиков на отдельных коротких участках туннеля незначительно, и потому имеется возможность поль-

зоваться толкателями, взамен тягового устройства, требующего сцепления отдельных ящиков в сплошной поезд. В остальных деталях (топочные устройства, каналы и т. д.) прямые и П-образные туннели могут выполняться единообразно, встречающиеся отличия не являются существенными и обусловлены либо различными производственными заданиями, либо разным подходом печных конструкторов и мастеров к постройке этих печей.

За последние десять лет на многих заводах в муфельных туннельных печах были устроены под руководством инж. П. С. Сквор-

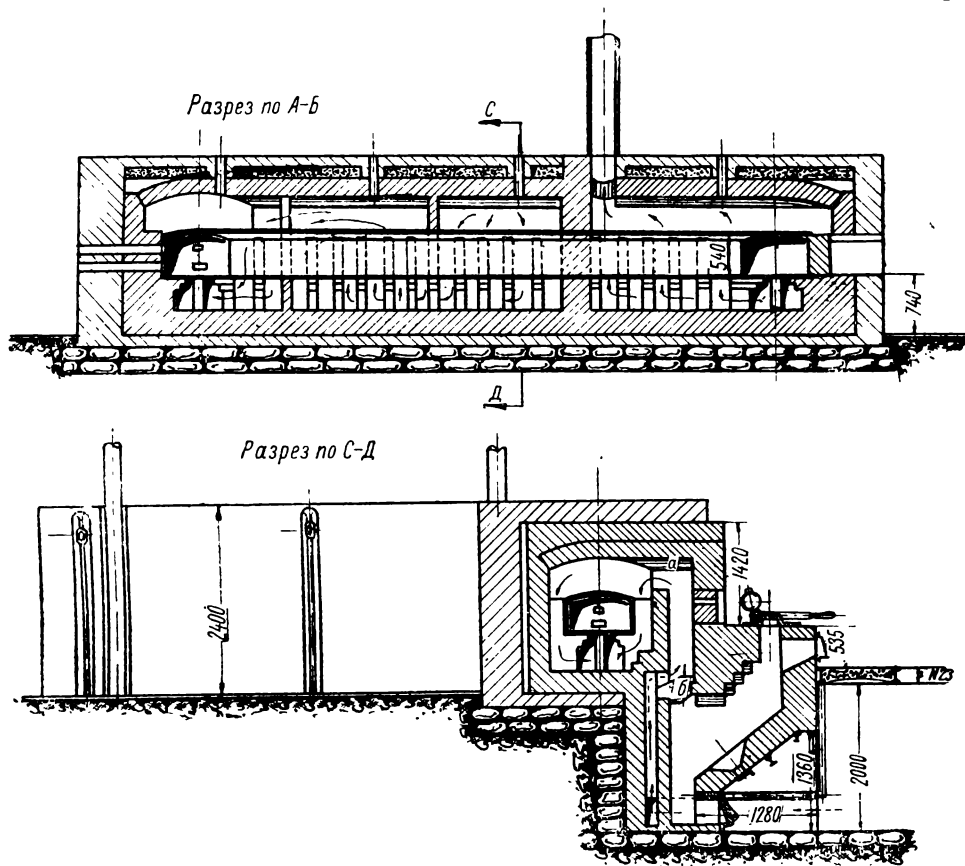


Рис. 188. Муфельная П-образная печь (разрезы).

цова, полугазовые толчки системы профессора В. Е. Грум-Гржимайло давшие хорошие результаты в смысле постоянного нагрева, экономного использования разных видов топлива и удобства обслуживания.

На рис. 187 и 188 показан план и разрезы муфельной туннельной печи Дмитровского фарфорового завода.

Длина канала печи в развернутом виде составляет, округленно, 22 м. Зона калия и подогрева имеет в длину около 11,5 м, а зона охлаждения — 10,5 м. Огневой туннель печи имеет в ширину 1,370 м и высоту до замка свода — 1,570 м.

В туннеле 1 на столбах, сложенных из огнеупорного кирпича, выложен из шамотных плит муфельный канал 2 шириной 78 см и высотой 43 см.

Печь отапливается полугазовой топкой, подающей топочные газы под свод огневого туннеля; опускаясь затем под муфельный канал и вновь подымаясь под свод, газы проходят зигзагообразный путь через зону каления и подогрева до выхода в бороз и дымовую трубу 4.

Охлаждение ящиков с готовой продукцией производится воздухом, который проходит от выходного конца туннеля к зоне каления, омывает муфельный канал снаружи и охлаждает его стенки; раскаленные в зоне каления изделия, поступая в зону охлаждения, отдают свое тепло непрерывно охлаждаемым стенкам муфеля.

Циркуляция воздуха и топочных газов показана в разрезах по *АВ* и *СД* (см. рис. 188).

Горячий воздух в туннельной печи данной конструкции отводится из зоны охлаждения в атмосферу, или же на отопление и вентиляцию помещений. В крупных туннельных печах горячий воздух, как правило, частично используется в виде вторичного воздуха в топках.

Как видно из рис. 188, в описываемой печи вторичный воздух проходит через два нижние горизонтальные канала и ряд вертикальных каналов, расположенных в задней стенке топочной шахты и попутно подогревается за счет тепла, развиваемого в топке. Путь вторичного воздуха показан стрелкой.

Устройство и работа полугазовой топки описаны в главе третьей

Полугазовые топки в малых туннельных печах, так же как и в печах средних размеров, показывают в эксплуатации хорошие качества: устойчивость режима, легкое и простое управление, высокий коэффициент полезного действия.

Печи описанного типа имеют характерную особенность: значительное разъедание и плавление части свода над шахтой топки под влиянием ударного действия пламени, несущего мелкую золу топлива. Этот участок свода рекомендуется выкладывать высокоогнеупорным шлакоустойчивым кирпичом, применение которого, как показала практика некоторых заводов, дает значительную экономию на ремонтах и связанных с ним простоях, несмотря на более высокую стоимость припасов.

Производственные показатели муфельных П-образных туннелей („скороспелок“) для обжига раскрашенных изделий колеблются в широких пределах, в зависимости от ассортимента изделий, качества топлива и потребной температуры обжига красок.

Производительность „скороспелок“ колеблется от 100 до 200 ящиков раскрашенного фарфора в сутки.

Загрузка ящика, в зависимости от ассортимента фарфора, обычно колеблется в пределах 30—500 штук и от 25 до 60 кг по весу.

Расход топлива в переводе на условное (7000 кал/кг), в зависимости от плотности загрузки ящиков и продолжительности их пребывания в зоне каления, колеблется в пределах от 0,35 до 0,60 т на 1 т выпущенной из обжига продукции.

В эксплуатации муфельных печей крупную статью расхода составляет износ решетчатых чугуновых или стальных ящиков, в которых перемещается посуда по муфельному каналу туннеля.

Устройство ящиков видно из рис. 189. В процессе обжига, ящики окисляются и подвергаются механическим воздействиям в период передвижения по каналу печи. Помимо общепринятого смазывания ящиков известью, для предохранения от быстрого окисле-

ний, в последние годы ставятся опыты хромирования ящиков и покрытия их окисью алюминия.

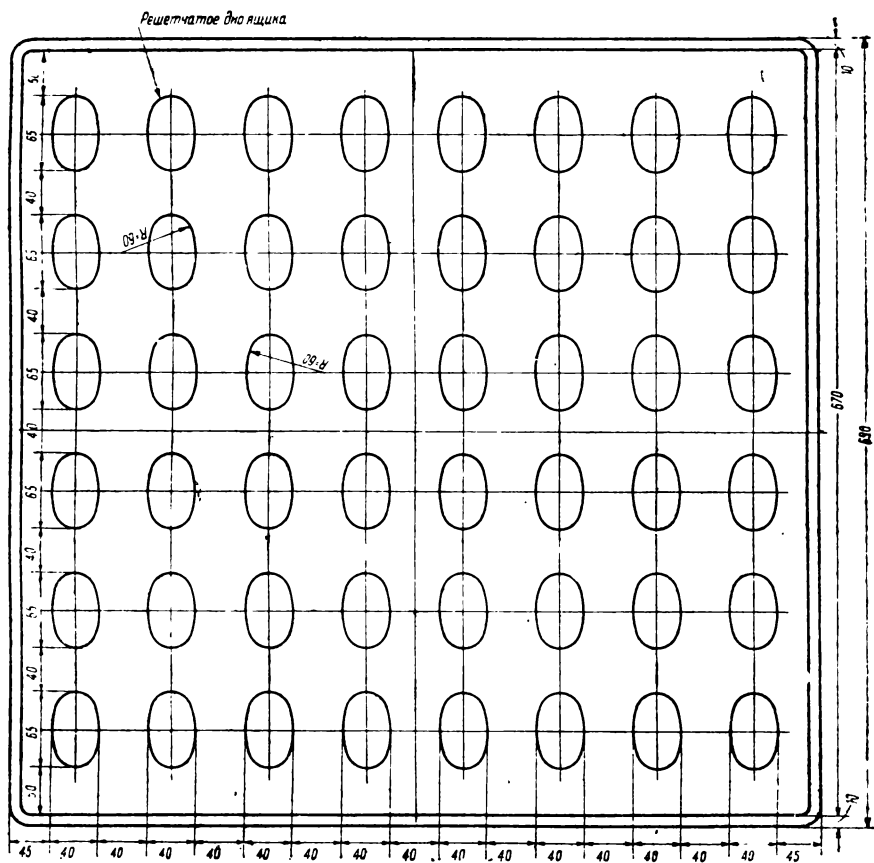
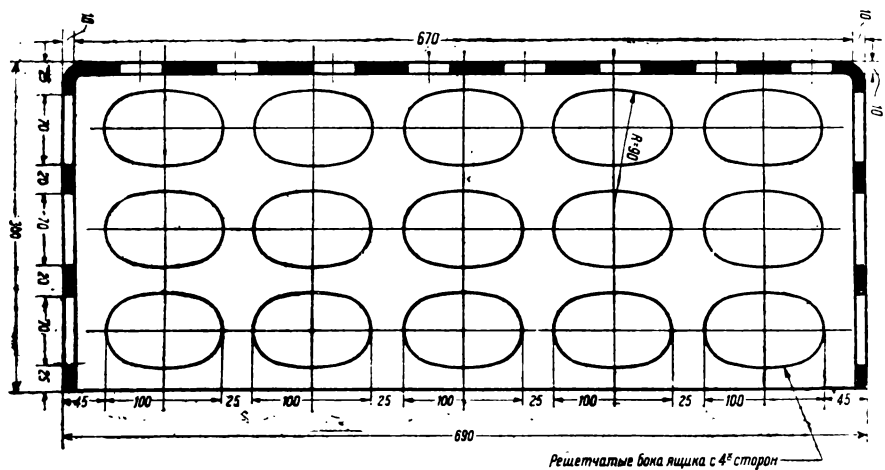


Рис. 189. Стальной ящик декорировочной печи.

В настоящее время жароупорные стали еще не получили применения для изготовления муфельных ящиков ввиду их дефицит-

ности, однако есть основание ожидать продолжительной и экономичной службы жароупорных ящиков после опытной проверки разных сортов стали в муфельных печах. Наиболее простое решение проблемы обжига раскрашенного фарфора и фаянса достигнуто в конструкциях газовых полумуфельных туннельных печей с вагонетками общепринятого типа и установленными на платформах ящиками из тонких шамотных плит. Удачным примером печей подобного типа может служить короткая туннельная печь Хайтинского завода, построенная для обжига раскрашенной фарфоровой посуды.

Показатели работы муфельных туннельных печей, применяемых для обжига фарфоровых и фаянсовых раскрашенных изделий, приведены в таблице 59.

Таблица 59

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ МУФЕЛЬНЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОБЖИГА РАСКРАШЕННОГО ФАРФОРА И ФАЯНСА <sup>1</sup>

Показатели работы печей	Печь с П-образным каналом Дулевского завода для фарфоровой посуды	Печь с П-образным каналом Дмитровского завода для чайной посуды	Печь с П-образным каналом Первомайского завода для азиатского фарфора	Печь с прямым каналом завода Коминтерн для столовой фарфоровой посуды	П-образная печь № 1 Калининского завода для столовой фаянсовой посуды
Длина канала печи, м . . . . .	23,07	18,69	21,89	13,5	28,48
"  зоны подогрева м . . . . .	7,73	6,57	6,65	—	7,70
"  "  обжига м . . . . .	7,61	5,80	7,79	—	7,78
"  "  охлаждения, м . . . . .	7,73	6,32	7,45	—	13,0
Ширина муфельного канала, м . . . . .	0,94	0,80	0,75	0,80	0,78
Количество ящиков в канале, шт.	30	24	—	—	—
Тип топки:	Полугазовая	Полугазовая	Полугазовая	Обыкновенная	Полугазовая
Размеры топки:					
ширина, м . . . . .	—	1,03	1,15	0,9	—
длина, м . . . . .	—	1,30	1,35	1,5	—
высота, м . . . . .	—	1,46	1,57	0,9	—
Расстояние от колосниковой решетки до верха муфеля, м . . . . .	—	3,10	3,12	1,7	—
Площадь колосниковой решетки, м <sup>2</sup>	—	0,46	0,45	1,35	—
Влажность дров, % . . . . .	—	30,5	29,8	37,4	—
Влажность торфа, % . . . . .	40,5	—	—	—	32,0
Часовой расход натурального топлива, кг . . . . .	270	324	324	149	190
Часовой расход условного топлива, кг . . . . .	104	136	137	55	85
Интервал между выходом вагонеток, мин. . . . .	7,81	7,7	7,18	15,3	9,23
Температура обжига в период обследования, °С . . . . .	—	824	850	900	800
Суточная (средняя) производительность в вагонетках (ящиках), ваг. . . . .	200	187	200	93,5	156

<sup>1</sup> Таблица составлена по результатам обследования муфельных печей, проведенного Оргфарфорстекло в 1936—1937 г. Обследование производилось инж. Солдатовым и инж. Голяновым под руководством инж. Гельмана.

Показатели работы печей	Печь с П-образным каналом Дулевского завода для фарфоровой посуды	Печь с П-образным каналом Дмитровского завода для чайной посуды	Печь с П-образным каналом Первомайского завода для азиатского фарфора	Печь с прямым каналом завода Коминтерн для столовой фарфоровой посуды	П-образная печь №1 Калининского завода для столовой фарфоровой посуды
Расход условного топлива на вагонетку, кг . . . . .	12,1	17,4	16,4	14,0	13,2
Вес изделий в 1 вагонетке (округленно), кг . . . . .	30	44	22	48	45
Расход условного топлива на 1 кг изделий, кг . . . . .	0,41	0,37	0,76	0,29	0,29
Суточный выпуск изделий, т . . . . .	6,00	8,20	4,33	4,52	8,38
<b>Показатели горения:</b>					
<b>а) у топочных вылетов</b>					
содержание CO <sub>2</sub> % . . . . .	15,5	13,1	12,1	14,0	15,9
CO % . . . . .	2,92	2,34	1,88	1,95	0,86
избыток воздуха α % . . . . .	1,08	1,37	1,43	1,55	1,3
температура топочных газов °С . . . . .	1318	1162	1318	1040	1208
тяга мм в. с. . . . .	1,65	—	+ 0,7	+ 0,5	— 2,16
<b>б) у шибера;</b>					
содержание CO <sub>2</sub> % . . . . .	9,1	11,6	12,4	10,2	6,5
CO % . . . . .	0,11	0,76	0,17	—	0,17
избыток воздуха α % . . . . .	2,57	2,21	1,41	2,1	3,07
температура отходящих дымовых газов °С . . . . .	806	833	824	650	530
тяга мм в. с. . . . .	— 6,12	—	— 8,3	— 3,8	— 13,7
Температура изделий, выходящих из печи °С . . . . .	299	380	330	343	305
<b>Расход тепла в % от теплопроизводительности сожженного в печи топлива:</b>					
тепло, уносимое из печи изделиями, % . . . . .	2,14	2,9	1,29	3,40	3,10
тепло, уносимое из печи стальными ящиками и шамотными лещадками, % . . . . .	3,50	4,00	3,32	3,20	3,20
потери тепла с уходящими в трубу дымовыми газами, % . . . . .	71,25	59,00	56,3	55,4	59,30
потери тепла от химической неполноты горения, % . . . . .	0,71	4,2	0,92	0,00	0,20
потери тепла от провала топлива через решетку, % . . . . .	3,00	0,50	1,00	0,50	3,00
потери тепла излучением в окружающую среду и с выходящим из муфеля горячим воздухом, % . . . . .	19,90	29,4	37,21	37,5	31,2
Полезное использование тепла на нагрев изделий до максимальной температуры обжига, % . . . . .	—	8,33	4,40	12,60	13,40

## II. Туннельные газовые печи для закрепления красок системы Емельянова

Возможность использования газообразного топлива в печах для обжига раскрашенных керамических изделий открывает широкие перспективы для усовершенствования конструкции печей и улучшения техно-экономических показателей их работы.

Очищенный генераторный газ дает ровное пламя, вполне приемлемое для закрепления красок. Специально приспособленные топки и постоянный избыток воздуха дают возможность при невысоких температурах получить равномерную окислительную атмосферу, не вызывающую дефектов на изделиях при непосредственном воздействии на них топочных газов.

В туннельной печи системы Н. А. Емельянова, построенной на Хайтинском фарфоровом заводе для обжига декорированной фарфоровой посуды, использованы все преимущества газового обжига и получены прекрасные результаты. По конструкции, удобству и выгоды эксплуатации эта печь является одной из лучших современных туннельных печей.

Размеры печи таковы:

Длина туннеля округленно . . . . .	40 м
„ зоны подогрева округленно . . . . .	15 „
„ топочной зоны . . . . .	4,5 „
„ зоны охлаждения . . . . .	15,5 „

Очищенный газ подается из общего газоочистителя газогенераторной станции завода, описанной в главе третьей, по железному клепаному трубопроводу к двум вертикальным стоякам, питающим горелки, расположенные под сводом топочной камеры и направленные по оси туннели навстречу поезду вагонеток (рис. 190). Подача газа к боковым горелкам регулируется чугунными шиберами, установленными в боковых стояках.

Топочная камера *а* расположена над поездом вагонеток, имеет в плане прямоугольную форму и отделяется от канала печи сводом из высокоогнеупорного припаса. Газ из вертикальных стояков поступает в топочную камеру через горелки и направляется сначала по каналу *в* к оси печи, а потом навстречу движению вагонеток (в плане газовые горелки показаны пунктиром).

Горячий воздух подается к газовым горелкам из зоны охлаждения под давлением от вентилятора *б*. Вентилятор всасывает горячий воздух, получающийся при охлаждении вагонеток с обожженными изделиями, и подает его на отопление помещения (а летом в атмосферу) и по боковому ответвлению от нагнетательного воздухопровода — в топку для сжигания газа. Горячий воздух подается в топочную камеру через широкий канал, расположенный над газовыми горелками (см. план горелок); подача его регулируется специальным чугунным шибером.

Температура горячего воздуха ниже температуры, господствующей в области горения газа, и потому более тяжелый воздух, опускаясь, вынужден пересекать проходящие ниже газовые потоки, что вполне обеспечивает хорошее перемешивание воздуха с газом и окончание процесса горения в топочной камере в равномерной окислительной газовой среде.

Топочные газы из сожигательной камеры опускаются по вертикальным каналам под шамотные ящики, загруженные раскрашен-

ными изделиями и установленные на платформах вагонеток. Таким образом в топочной зоне обжигаемый фарфор защищен от непосредственных резких ударов пламени боковыми стенками, так что на

этом участке обогревание производится „полумуфельным способом“. Далее топочные газы поднимаются под свод канала печи, омывают ящики с загруженной продукцией со всех сторон и направляются навстречу поезду вагонеток к газоотводным каналам.

Отбор газов производится с обеих сторон вагонеток в трех точках на протяжении 5 м от входного конца туннеля. Сборные каналы г, расположенные в кладке стен туннеля, вертикальными стояками соединяются с подземными борами д, выводящими дымовые газы через сборный боров к дымососу. С помощью дымососа отработавшие газы выбрасываются через железную дымовую трубу в атмосферу. Тяга регулируется шибером.

Охлаждение вагонеток производится муфельным способом. Канал в зоне охлаждения перекрывается по габариту вагонеток с боков и сверху чугунными плитами, образующими муфель. Ме-

жду стенками муфеля и кирпичной кладкой туннеля вентилятором засасывается воздух из атмосферы.

Помимо теплоотдачи через стенки муфеля, ящики могут частично

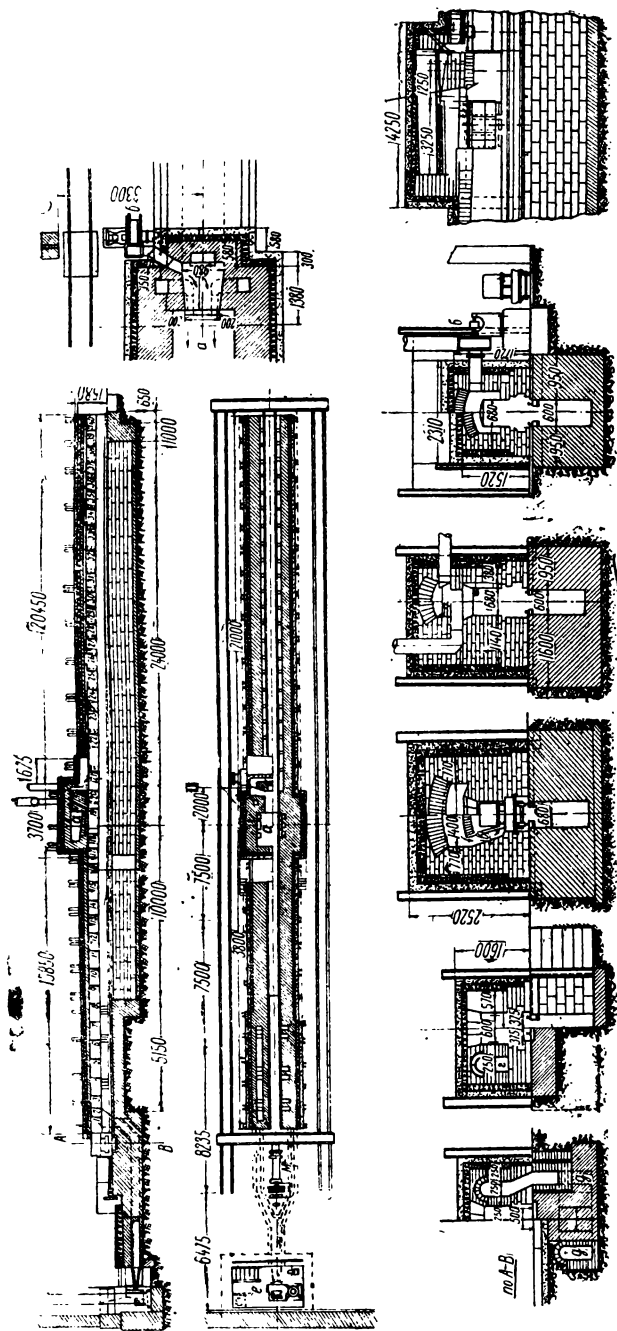


Рис. 190. Муфельная туннельная печь для обжига раскрашенных изделий системы Емельянова.



охлаждаться непосредственно потоком воздуха, засосанного через неплотности вагонеток и выходные двери туннеля под влиянием разрежения в топочной зоне, обусловленного тягой дымососа.

Весьма целесообразно устроены вагонетки и ящики для загрузки обжигаемого фарфора. Устранение муфельного обогрева дало возможность использовать в данной печи вагонетки обычного типа небольших размеров с шамотным огнеупорным подом (рис. 191). На платформе на шамотных кирпичах установлен чугунный каркас, в стойках которого имеются пазы для закладки тонких шамотных пластин (лещодок).

Ящики с фарфором омываются со всех сторон топочными газами, что обеспечивает равномерный обжиг даже при увеличении кубатуры

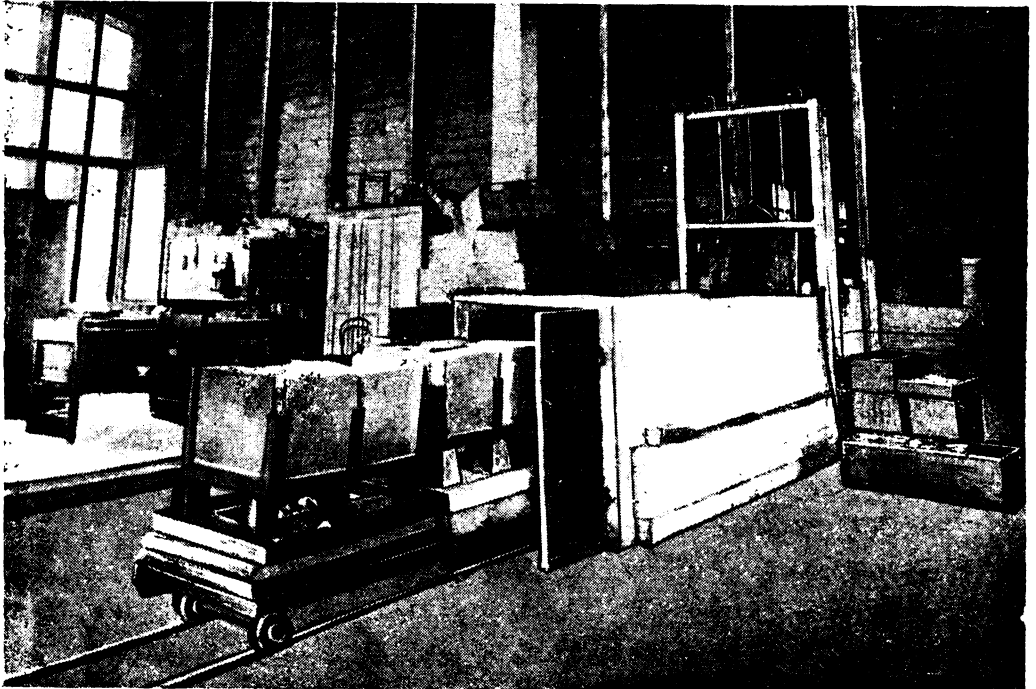


Рис. 191. Входной вестибюль и вагонетка газовой декорировочной печи.

ящиков против обычной для ящиков, применяемых в муфельных печах. Чугунный каркас ящиков не испытывает при продвижении тех механических воздействий, которым подвергаются в нагретом состоянии чугунные и стальные ящики муфельных печей для декоративного обжига при перемещении их лебедкой, и потому срок их службы по сравнению с последними, удлиняется в 2—3 раза.

Вагонетки передаются с запасного пути, где они загружаются раскрашенным фарфором, на главный путь туннеля с помощью ручной передаточной вагонетки простой конструкции. Протаживание вагонеток производится периодически винтовым толкателем с электромоторным приводом.

На рис. 192 показана концевая часть зоны охлаждения туннеля с вертикальным шибером, двухстворчатыми дверями и вагонетками, нагруженными фарфором. Перед началом передвижения вагонеток

при закрытом шибере из вестибюля (зона охлаждения) вручную вытаскивают остывшие вагонетки, потом закрывают входные двери, открывают вертикальный шибер и дают световой и звуковой сигналы о готовности зоны охлаждения к продвижению вагонеток. Обслуживается печь системы Емельянова очень просто. Температура обжига регулируется продолжительностью выдержки вагонеток в зоне каления или увеличением количеств газа и горячего воздуха, подаваемых в топочную камеру.

По своей конструкции эта печь может быть также использована для обжига разных изделий и при более высоких температурах, но для этого потребуется кладка топочной зоны из высокоогнеупорных

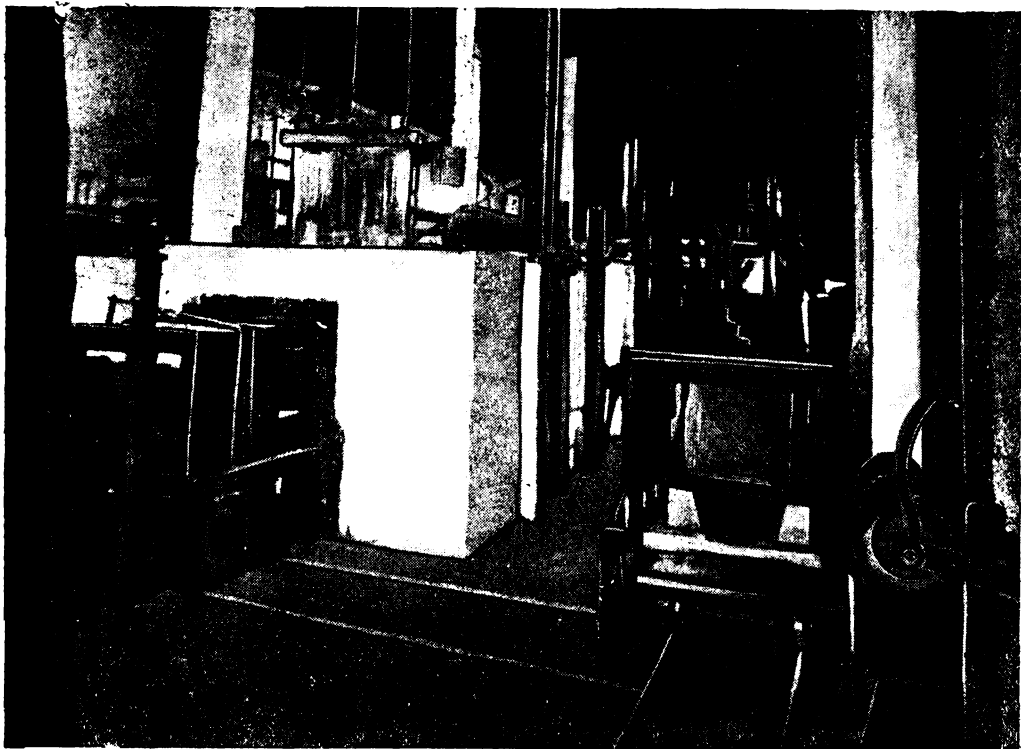


Рис. 192. Выходной вестибюль печи.

материалов и соответствующая система загрузки вагонеток (капсели или этажерки из высокоогнеупорного шамотного припаса).

В ближайшие годы следует ожидать более широкого использования коротких туннельных печей системы инж. Н. А. Емельянова как для обжига декорированной керамики, так и для бисквитного и политого обжига разных фарфоровых и фаянсовых изделий при небольшом объеме производства.

### III. Муфельные туннельные печи для кратковременного обжига

Туннельные печи для обжига разных специальных видов керамических изделий муфельным способом имеют небольшую длину порядка 8—15 м с сечением муфельного канала в пределах  $0,75 \times 0,5$  м.

Одна из таких печей показана в плане и разрезах на рис. 193 и 194.

Печь предназначена для обжига автосвечных изоляторов и других подобных изделий с коротким периодом обжига.

Муфельный канал печи имеет сечение  $420 \times 320$  мм, длину 9,5 м и собирается из отдельных плит, изготовленных из алундового материала. Нижняя часть муфеля состоит из плиты с тремя канавками, в которых расположены алундовые шарики для передвижения плит с нагруженными капсулями. Боковые и верхняя части муфеля собраны также из алундовых плит, причем плиты сделаны взакрой, во избежание проникновения продуктов горения из внешнего канала непосредственно в муфель. Боковые и верхние плиты сделаны с выем-

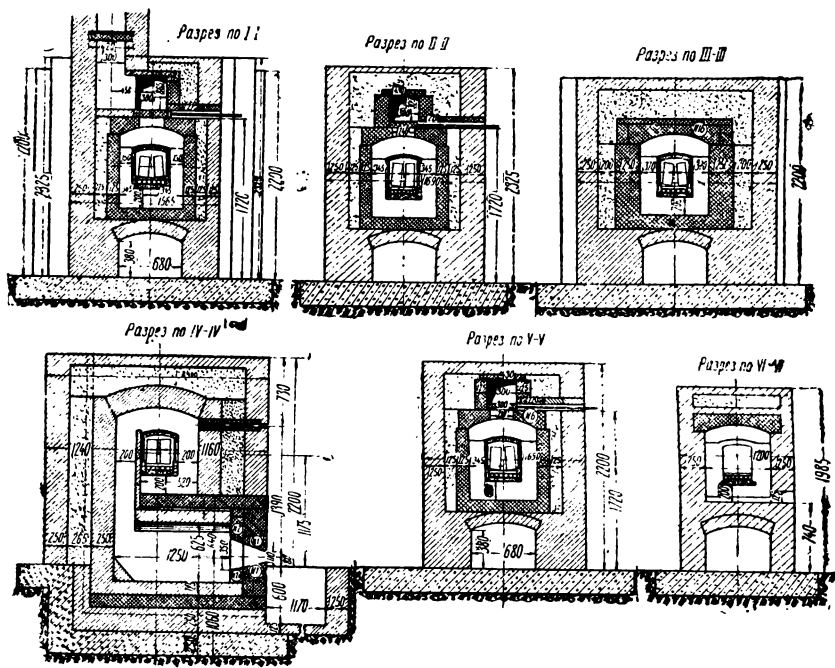


Рис. 194. Разрезы по отдельным зонам муфельной печи.

ками, чтобы получить более тонкую стенку самого муфеля и лучшую передачу тепла обжигаемым изделиям.

Снаружи в стыках муфель поддерживается выступами стен, выложенных из огнеупорного кирпича.

Снизу муфель покоится на поперечных стеночках, обеспечивающих хорошую устойчивость пода муфеля и являющихся одновременно перегородками, разобщающими отдельные ходы для пламени и продуктов горения.

В средней части туннельной печи, внизу под муфелем, расположена нефтяная топка.

Форсунка для распыления мазута прикрепляется к железной плите во фронтальной части горелки. Развиваемое в горелке пламя поднимается вверх, омывает муфель и отбрасывается вниз. Благодаря наклонному расположению поперечных плит над муфелем и сводом печи, создаются каналы винтообразной формы, что заставляет пламя идти в зоне подогрева по винтовой линии вокруг муфеля, омывая

его со всех сторон. На расстоянии около 2,5 м от топки продукты горения могут быть отобраны из печи через особые окна в вышележащий дымовой канал. Отборных окон устроено всего 5 шт., что дает возможность вести по желанию отбор продуктов горения ближе к зоне горения или дальше от нее, т. е. регулировать подъем температур обжигаемых изделий в зоне подогрева.

Для наблюдения за ходом пламени с боков печи устроены глазки, которые в обычных условиях всегда закрыты. Крышка открывается лишь во время наблюдения, чтобы обеспечить постоянство тяги в печи.

Для контроля температуры в своде оставлены отверстия, куда вставляются пирометры.

Обожженный материал, передвигаясь на плитках, поступает из зоны максимальной температуры в зону охлаждения, где отдает аккумулированное тепло через стенки муфеля наружу. С боков зоны охлаждения устроены два воздушных канала, через которые подводится холодный воздух для охлаждения муфеля. Воздух, подогретый за счет остывающего товара, отводится непосредственно наружу.

Чтобы иметь возможность регулировать отбор теплого воздуха через отдельные отверстия, соединяющиеся со сборным каналом, расположенным над муфелем, установлено три регулировочных особых шибера.

В целях лучшего охлаждения конца печи, шамотовый муфель на протяжении около 2,5 м заменяется металлической коробкой.

Снаружи печь облицовывается строительным кирпичом и связывается металлическим каркасом для обеспечения большей устойчивости самой кладки.

Отдельные плиты передвигаются внутри печи на шариках при помощи специального толкателя. Толкатель, расположенный впереди печи, состоит из винта с квадратной нарезкой и гайки, являющейся основной частью толкателя. При вращении ручки винт принуждает связанную с ним гайку совершать поступательное движение; гайка захватывает двумя болтами плитку и проталкивает ее вперед.

На болтах укрепляется деревянный брусок. Этим достигается более равномерное распределение давления на плиту. Кроме того, продвижение самой плиты в печи может быть изменено, в зависимости от ширины взятого бруска.

Двери для закрывания муфеля как с входной, так и с выходной стороны устроены подъемными с контргрузами. В обычных условиях дверь всегда должна быть закрыта и открывается лишь при продвижении или разгрузке капсул из печи.

Дверь представляет собой металлическую коробку, внутри заполненную смесью инфузорной земли с небольшим количеством глины. Эта смесь после просушки затвердевает и предохраняет дверь от излишнего прогрева.

С выходной стороны около двери устраивается специальный ящик для приема выходящих из печи шариков. Шарик этот, по мере накопления, вновь переносится к входной части печи для дальнейшего использования при продвижении изделий.

Форсунка для распыления мазута устроена с двойным подводом воздуха. От вентилятора воздух поступает по одной трубе, внутри же самой форсунки расходится по двум каналам. Каждый из этих каналов имеет свой регулирующий дроссель. Дроссельный клапан регулирует поступление воздуха во внутреннюю часть форсунки, где струя воздуха распыляет мазут; от большего или меньшего коли-

чества поступающего сюда воздуха зависит большая или меньшая интенсивность распыления горючего.

Струя смеси воздуха с мазутом, ввиду сужения выходного отверстия форсунки, получает большую скорость и подается непосредственно в топку. При желании изменить длину и характер пламени, воздух подводится частично через канал, регулируемый вторым дроссельным клапаном.

Воздух, поступающий через этот канал, охватывает при вылете из форсунки газовый конус мазутной смеси и, таким образом, можно регулировать длину пламени, даваемого форсунками.

Подача мазута к форсунке производится при помощи гибкого шланга через особый кран. В случае засорения, отвертывается нажимной болт, отбрасывается скоба и форсунка вынимается для прочистки.

Мазут подогревается паровым змеевиком в напорном баке до температуры 50—60°С для обеспечения полного распыления мазута.

Печь сходной конструкции для обжига тайритовых дисков, длиной в 15 м и производительностью около 150 шт. в сутки, построена на фарфоровом заводе „Пролетарий“ в Ленинграде.

#### IV. Туннельные печи с кольцеобразным каналом

Для постройки мощных туннельных печей требуется помещение, длиной не менее 100 м.

Стремление к постройке туннельных печей, взамен периодических, в зданиях с небольшой длиной печного цеха или на открытом воздухе привело к проектированию малых туннелей с каналом, изогнутым в форме кольца (рис. 195).

Кольцеобразные туннельные печи имеют большое сходство с печами для отжига стекла, в которых, так же как и в этих последних, использован непрерывно вращающийся под.

Кольцеобразные печи применяются, преимущественно, для обжига изделий при температурах порядка 750—1200°С.

Туннельная печь этого типа с муфельным обогреванием была построена в США для обжига раскрашенной посуды в 1930 г. В последующие годы в Англии и США (ф. Лед Кронин) построены печи с прямым действием пламени.

Кольцеобразный туннель,<sup>1</sup> построенный на заводе Джордж Поттери и К<sup>о</sup> (США) для обжига хозяйственной посуды на бисквит, имеет средний диаметр в 18,3 м, а развернутую длину пода по средней окружности в 57,9 м. Длина канала в развернутом виде — 44,18 м, в том числе: зона подогрева — 18,28 м, зона обжига — 7,62 м, зона охлаждения — 18,28 м.

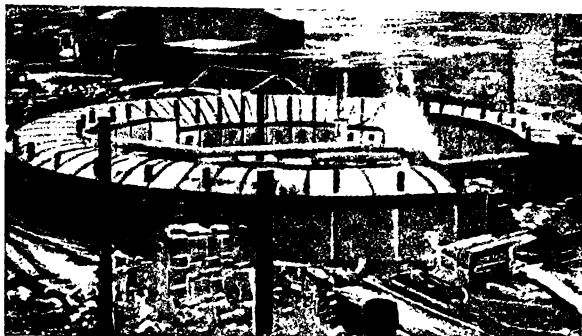


Рис. 195. Кольцевая печь для обжига огнеупоров.

<sup>1</sup> „Сег. Industry“, № 5, 1931. — „Керамика и стекло“, № 7—8, 1932.

Часть вращающегося пода печи (рис. 196) на протяжении 13,72 м открыта и служит для загрузки изделий перед зоной подогрева и разгрузки продукции, выходящей из зоны охлаждения.

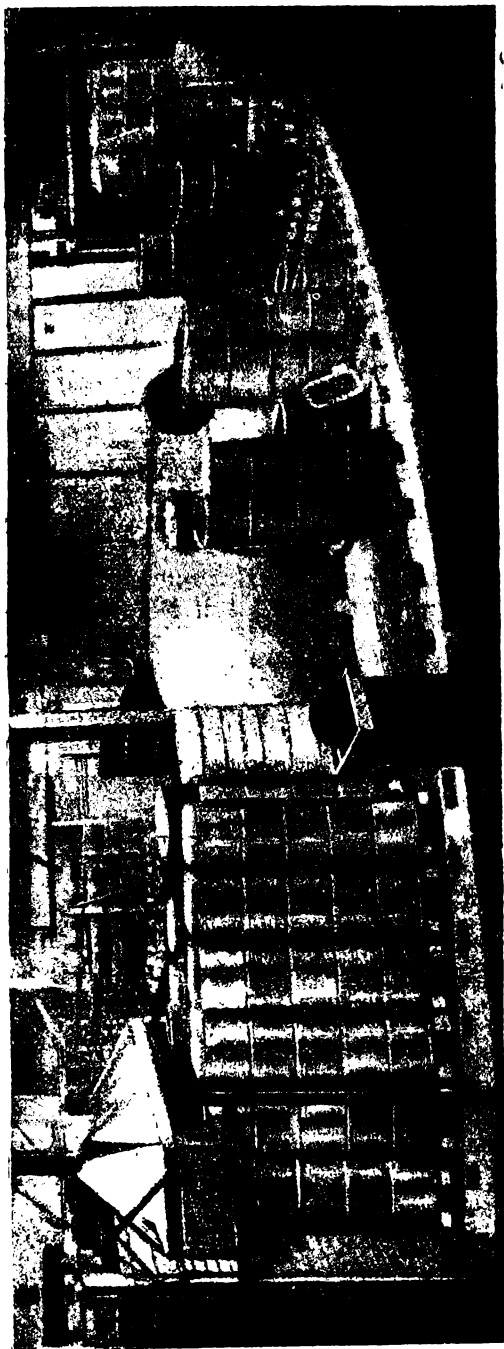


Рис. 196. Кольцевая печь для обжига полуфарфора системы Ledd-Cronin Eng. Co.

Канал печи имеет в ширину 0,76 м и в высоту 0,91 м.

Вращающийся под печи монтирован на кольцеобразной двутавровой балке, катящейся по каткам. Благодаря хорошей изоляции огнеупорного подового настила, температура катков и букс невысока.

Передача тепла от платформы к подшипникам катков протекает на очень небольшой поверхности соприкосновения двутавровой опорной балки с катками и потому нет пригорания смазки и буксования катков, иногда имеющих место в вагонетках прямых туннельных печей.

Существенным достоинством печей этого типа является отсутствие в кольцевом поду щелей, неизбежных в месте стыков обычных туннельных вагонеток, даже при тщательной укладке прокладок из асбеста. Благодаря этому, в кольцевых туннельных печах сокращаются засосы воздуха в печной канал и выдувание печных газов в нижний канал при положительном давлении в печном канале.

Печь отапливается натуральным газом 14 горелками (по 7 с каждой стороны) с непосредственным действием пламени. Температура обжига около 1200°C.

Циркуляция топочных газов и воздуха осуществляется с помощью обычных вентиляторов.

Кольцевая форма канала, в отличие от формы прямых туннельных печей, при значительной его ширине может служить причиной неравномерного нагрева продукции на внешней и внутренней стороне

платформы. При одинаковой плотности загрузки по всему сечению канала, циркуляция топочных газов происходит более интенсивно по линии наименьшего сопротивления, т. е. вдоль внутренней стены туннеля.

Концентрация всех работ по загрузке и разгрузке печи на коротком участке свободного пода затрудняет ее обслуживание.

Вращение кольцевой платформы печи производится от электромотора через редуктор; мотор и редуктор расположены внутри печного кольца.

Вращение от редуктора передается с помощью нескольких горизонтальных валов каткам, на которых катится кольцевая платформа печи. Скорость движения платформы легко регулируется редуктором.

Кольцевая туннельная печь сходной конструкции несколько лет работает в Англии на обжиге санитарного фаянса.

Приводим некоторые данные об устройстве и работе этой печи.

Средний диаметр кольцевого печного канала . . . . .	25,2 м
Ширина печного канала . . . . .	1,98 "
Высота . . . . .	2,40 "
Сечение . . . . .	4,75 м <sup>2</sup>
Свободная часть кольцевого пода для загрузки и выгрузки продукции . . . . .	6 м
Скорость движения платформы . . . . .	0,5—0,76 м/час
При обжиге облицовочных плиток скорость . . . . .	0,45 м/час
Длина зоны горения около . . . . .	10 м
Выпуск разных санитарных изделий (при скорости дви- жения пода 0,5 м/час) в месяц . . . . .	200—300 т
Суточный расход топлива (каменный уголь) . . . . .	6,5 т

Печь по длине и сечению канала может быть отнесена к печам средней мощности.

Кольцевые туннельные печи, как и прямые, имеют все технические и экономические преимущества непрерывно действующих агрегатов. Успешно используются кольцевые туннельные печи муфельного обжига для закрепления красок на фарфоре и фаянсе: загрузка изделий производится без капсулей, и все операции можно организовать даже на коротком участке свободного пода длиной от 4 до 6 м.

## V. Электрические туннельные печи

Туннельные печи, обогреваемые электрическим током, отличаются по конструкции и методике обжига от пламенных печей и при некоторых условиях могут успешно конкурировать с ними.

В электрических туннелях нет интенсивной циркуляции горячих газов; нагрев изделий и охлаждение их происходит, главным образом, за счет лучистой теплоты.

Процесс передачи тепла от раскаленных электрическим током элементов сопротивления имеет некоторое сходство с передачей тепла от раскаленных карборундовых коробок в муфельных туннельных печах системы Дресслера.

В пламенных печах из камеры рабочего канала туннеля должны непрерывно удаляться отработанные дымовые газы, уносящие с собой значительную долю вводимого в печь тепла.

В электрических печах, где нет постоянного интенсивного газообмена, почти нет и потерь тепла с отходящими газами.

Это обстоятельство, а также большие удобства обогрева электрической энергией, были использованы при создании ряда остроумных конструкций, имеющих целью возможно полное использование тепла в печном канале.

Помимо весьма тщательной изоляции печей от потерь в окружающую среду, особое внимание обращено на использование тепла охлаждающихся изделий для подогрева вновь поступающих в туннель, тогда как в пламенных печах это тепло используется лишь частично для нагревания подвального к топкам горячего вторичного воздуха.

Задача использования тепла получила весьма удачное разрешение путем применения двух встречных поездов вагонеток; при достаточной длине туннеля почти все тепло остывающих вагонеток может быть передано встречным вагонеткам, несущим сырые изделия.

По данным фирмы Ридгаммер, полезное использование тепла в электрической туннельной печи, построенной в Швеции, составляет 17% и путем изменения конструкции может быть еще повышено.

На рис. 197 показан план туннельной печи для обжига хозфарфора.

Канал туннеля длиной в 45 м имеет зону обжига и две аналогичные между собой так называемые рекуперативные зоны предварительного подогрева и вмещает два встречных поезда вагонеток.

Вагонетки поезда, нагруженного сырыми изделиями, по мере продвижения к зоне обжига, встречают все более нагретые вагонетки второго поезда, выходящие из обжига, и подогреваются лучистой теплотой последних.

Разумеется, фарфор в зоне рекуперации подогревается быстрее и до более высоких температур со стороны раскаленного фарфора

встречного поезда, чем в части вагонетки, граничащей с наружной стенкой туннеля. Естественные конвекционные потоки, возникающие в канале под влиянием разности температур подогреваемых и охлаждающихся вагонеток, слишком слабы и не могут уравнивать температуру по сечению вагонетки.

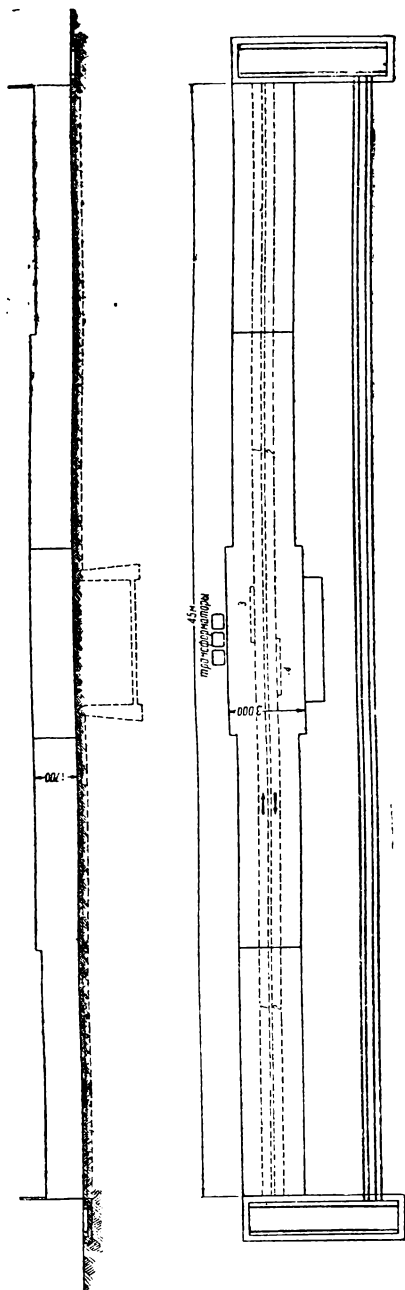


Рис. 197. Схема электрической туннельной печи системы Ридгаммера.



Имеется ряд устройств, способствующих усилению циркуляции воздуха и выравниванию температуры по сечению вагонеток. К их числу следует отнести применяемое в ряде конструкций печей такое устройство и размещение нагревательных элементов, которое обеспечивает хорошее омывание последних восходящими потоками воздуха и принудительную циркуляцию горячего воздуха по каналам в наружных стенах туннеля, смежных со входящими в туннель вагонетками, и ряд других более или менее надежных устройств.

Все попытки выравнять температуру по сечению вагонетки в рекуперативных зонах лишь частично достигают цели. Более полное выравнивание температуры получается, как правило, только в зоне

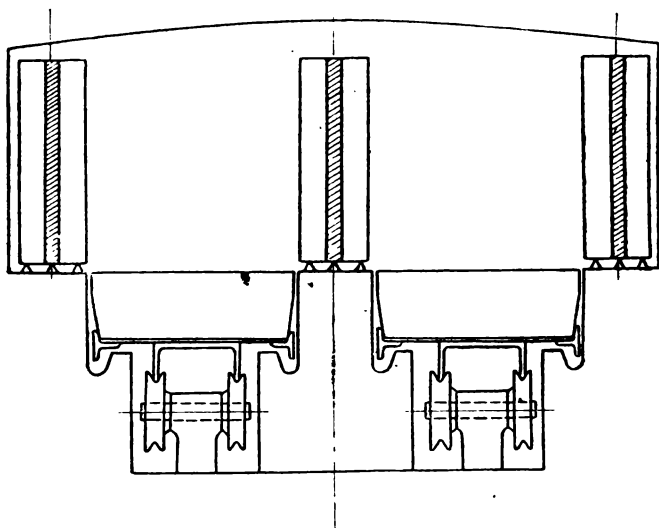


Рис. 198. Схема размещения электрических нагревательных приборов при встречном движении вагонеток.

обжига, где, благодаря расположенным у стен туннеля нагревательным элементам (рис. 198), нагрев крайних штабелей вагонеток доводится до заданной температуры обжига.

В целях улучшения теплопередачи и сокращения расхода энергии, фарфоровые и фаянсовые изделия нагружаются на вагонетки без капселей на легком огнеупорном каркасе из плит и колонок.

При небольшой ширине и высоте нагрузки вагонеток (около  $0,5 \times 0,5$  м), применяемый в современных электрических печах метод установки изделий на каркас несложен и в известных условиях (легкий ассортимент, огнеупорный припас высокого качества) может быть достаточно выгоден в эксплуатации.

Р. Джоулл и М. Туле<sup>1</sup> провели специальные исследования по обжигу фарфора в опытной электрической печи для установления оптимального режима обжига в туннельных электрических печах.

<sup>1</sup> R. E. Gould and M. G. Toole. Preliminary Experiments for the Development of a Continuous Electric Ceramic Kiln for High — Temperature Burning. Ceramic Age, № 4, 1936.

ХАРАКТЕРИСТИКА НЕКОТОРЫХ ЭЛЕ

Система печи (или наименование фирмы)	Место работы печи	Обжигаемая продукция	Длина печи в м	Количество вагонеток
1. Печь № 1 (Morgan Crucible Co Lmd (3), Лондон) . . . .	Швеция	Фарфоровая посуда, чашки	16,7	33
2. Печь № 2 с двумя встречными поездами (той же фирмы) . . . . .	"	"	18,3	12
3. Фирма не указана . . . . .	Завод Losian Wedgwood	Художественные эмали	25	18
4. Печь с двумя встречными поездами (The Electric Furnace Co) . . . . .	S. Sons Salem Ohio, США	Хозяйств. фарфор, облицовочные плитки	—	28
5. Печь с двумя встречными поездами L. Riedhammer.	Проект	Хозяйств. фарфор	45	—

Фарфор, предварительно обожженный на бисквит при температуре 900° С, обжигался в электрической печи до 1350—1400° С в разных типах печей.

Начиная с 1000°, обжиг производился в искусственно созданной восстановительной атмосфере, так как при окислительной атмосфере от содержащейся окиси железа получается желтоватый оттенок. Так как обжигаемый фарфор (50% каолина, 33% полевого шпата, 17% кварца) практически не содержал в массе углерода, то введение в электрическую печь восстановительной атмосферы производилось в разные периоды обжига через 50-градусные интервалы, начиная с 900° С. В результате этих опытов установлено, что влияние восстановительного режима было одинаково и не зависело от температуры в пределах от 900° С и до начала плавления глазури, когда газы не могут проникать в поры черепка.

Введение восстановительной атмосферы при более высоких температурах давало более гладкую глазурь и большую прозрачность черепка.

Оказалось возможным вводить восстановительную атмосферу и в интервале 1100—1200° С, что свидетельствует о быстром прохождении процесса восстановления (в данных опытах, примерно, в течение 1 часа). Переход после 1200° С на окислительную атмосферу не влиял на черепок, но качество глазури получалось лучшим, когда восстановительный режим сохранялся до конца обжига.

Количество окиси углерода в печной атмосфере (от 3 до 30%) не оказывало заметного влияния на качество фарфора. Введение окислительной атмосферы при температуре 1000° С после восстановительной давало на поверхности полосы, не исчезающие при дальнейшем обжиге в восстановительной атмосфере. Возможно, что причиной этого является внезапное сгорание окиси углерода с местными перегревами и преждевременным сплавлением глазури, исключаяющим

КТРИЧЕСКИХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ<sup>1</sup>

Используемое сечение вагонетки в м		Выпуск продукции шт. в час	Скорость перемещения вагонетки м в час	Количество нагревательных элементов	Температура обжига в °С	Расход электроэнергии в кВт·ч при указанной производительности
ширина	высота					
—	—	180	3	1	—	—
0,60	0,15	600 (чашек)	9	2	—	70
—	—	—	—	—	900	44
—	—	250 шт. 9,35 м <sup>2</sup>	—	2	1230	—
0,735	0,30	600 чашек или блюдец	2,5—2,7	3	от 1250 до 1350	80

попадание окиси углерода в черепок при дальнейшем обжиге в восстановительной атмосфере. По мнению авторов статьи, небольшие трудности быстрого обжига возникают вследствие отложения в черепке углерода при разложении окиси углерода в период плавления глазури, так как это ведет к появлению бурых пятен в черепке и глазури, пузырьков и мельчайших наколов, снижающих глянецвитость и блеск глазури.

Наилучшие результаты обжига фарфора в электрической опытной печи получились при продолжительности обжига около 8 часов.

Проведенные опыты указывают на возможность быстрого обжига фарфора в электрических печах, которые по своей конструкции могут обеспечить регулирование газовой среды в зонах обжига и подогрева от окислительной до восстановительной.

Определение наиболее благоприятных габаритов и мощностей электрических туннельных печей является в настоящее время еще неразрешенной проблемой.

Использование обычных при проектировании пламенных печей приемов обжига вряд ли возможно, так как характер обжига в электрических туннельных печах имеет ряд особенностей, вытекающих из основных принципов их работы.

Для нагрева изделий, а также для удаления из черепка гигроскопической и гидратной воды требуется больше тепла, чем можно получить от остывающих встречных вагонеток. Поэтому температура поступающих в зону обжига вагонеток, как правило, ниже температуры уходящих вагонеток (по отдельным участкам подогревательной зоны).

Здесь нет тех больших запасов тепла, которые несут отработанные газы навстречу сырым изделиям в пламенных туннельных

<sup>1</sup> Ряд показателей, не приведенных в таблице, отсутствует в первоисточниках.

печах, что обеспечивает относительно постепенное повышение температуры.

Поэтому при переходе вагонеток в зону обжига, где на продукцию излучается тепло от нагревательных элементов и раскаленных стен, кривая температуры дает резкий подъем, который особенно опасен для штабелей, расположенных ближе к наружной стене туннеля и нагревательным элементам.

Чем шире и выше загрузка вагонеток изделиями, тем сложнее самый процесс загрузки вагонеток на огнеупорный каркас и тем труднее обеспечить равномерный обжиг в электрических туннельных печах и получить заданную кривую обжига. Повидимому, эти трудности и лимитируют производительность современных электро-туннельных печей.

Сводные данные о размерах производительности и других показателях электрических туннельных печей приведены в таблице 60.

## VI. Типы и конструкции нагревательных элементов в электрических туннельных печах

Материалы, применяемые для изготовления нагревательных элементов электрических печей, должны удовлетворять трем основным требованиям:

1) большое удельное сопротивление, приблизительно около  $1,5 \text{ } \Omega/\text{мм}^2/\text{м}$ ;

2) малый температурный коэффициент;

3) нечувствительность к длительному нагреванию при высоких температурах (медленная окисляемость) и относительно высокая механическая прочность.

В условиях высоких температур и окислительной атмосферы керамического обжига, третьему требованию удовлетворяет весьма ограниченное количество материалов.

В керамических печах могут применяться, главным образом, сплавы хрома и никеля (нихром, хромоникель, хромель, хромалой) которые выдерживают температуру порядка  $1000^\circ \text{C}$  и характеризуются данными, приведенными в таблице 61.

Таблица 61

Название	Состав %	Удельный вес	Удельное сопротивление в $\Omega/\text{мм}^2/\text{м}$	Максимальная допустимая температура в $^\circ \text{C}$
Nichrom I . . . . .	50 Ni, 22 Cr, 26 Fe, 2 Mn	8,29	1,09	970
"  II . . . . .	Ni, Cr, Fe	8,25	1,1	1 000
"  III . . . . .	85 Ni, 15 Cr	8,40	0,9	1 050
"  IV . . . . .	80 Ni, 20 Cr	8,36	1,03	1 100

Температуры, которые могут поддерживаться металлическими нагревательными приборами, достаточны лишь для закрепления керамических красок и легкоплавких эмалей.

Для достижения более высоких температур электронагревательные элементы изготавливаются из углерода в различных его формах, карборунда и специальных составов, основной частью которых является достаточно огнеупорный керамический каркас.

Удельное электрическое сопротивление цейлонского графита

около 0,50  $\Omega/\text{мм}^2/\text{м}$ . Теплопроводность графита 0,0185  $\text{кал}/\text{см}/\text{см}^2/\text{сек}$  при 1300° С.

Удельное сопротивление графитного порошка значительно выше, зависит от крупности зерен и понижается при увеличении давления (сжатия).

Графит и близкие к нему углеродистые составы для нагревательных устройств довольно устойчивы под действием высоких температур. Процесс выгорания (старения) графита начинается при температуре в 700° С и протекает довольно медленно, чем и обусловлено его применение в массах для изготовления крупных пластинчатых элементов сопротивления.

Широко применяются элементы сопротивления, изготовленные из карборунда — соединения кремния с углеродом. Удельное омическое сопротивление элементов из карборунда колеблется в довольно широких пределах, в зависимости от содержания  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Наибольшее распространение получили нагревательные стержни для электрических печей, изготавливаемые фирмой Сименс под названием „Силит“ и фирмой Глобар-Корпорейшен под названием „Глобар“.

Для получения стержней зерна карборунда цементируются каждой фирмой своими запатентованными методами.

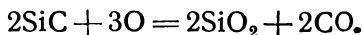
Основное отличие „Силита“ от „Глобара“ заключается в разной величине зерен карборунда.

В „Силите“ величина зерен колеблется в пределах 120—200 меш с примесью мельчайшей пыли (минутников). „Глобар“ состоит из кристаллов величиной в 10—36 меш, 200 меш и минутников. Содержание железа в силитовых стержнях колеблется около 2%.

Удельное омическое сопротивление „Силита“ колеблется около 0,1—0,2  $\Omega$  на  $\text{см}^2/\text{см}$ , а „Глобара“ — около 0,09—0,5  $\Omega$  на  $\text{см}^2/\text{см}$ .

Стержни из карборунда весьма устойчивы при высоких температурах и начинают разлагаться лишь около 2200° С, а в присутствии паров воды — выше 1400° С.

Старение „Силита“ и „Глобара“ протекает по формуле:



Повышение содержания  $\text{SiO}_2$  в нагревательных элементах увеличивает их сопротивление.

Срок работы „Силита“ и „Глобара“, при непрерывном нагревании в пределах 1000—2000° С, доходит до 5000 час.

Подвод электрического тока к элементам сопротивления, нагреваемым в работе до температуры в 1400—2000° С, требует специальных контактных устройств. Для снижения температуры нагревательных элементов у места присоединения к электрическим проводам концы силитовых стержней делаются утолщенными или же металлизируются, чем снижается сопротивление и нагрев этих частей элемента. На рис. 199 показаны контактные устройства к нагревательным элементам „Глобар“ в двух вариантах — для температур в печи порядка 1200 и 1500° С.

Концы элемента для температуры до 1200° С покрыты тонким слоем медленно окисляющегося металла и поддерживаются двумя металлическими стержнями, имеющими в торцах воронкообразные углубления.

Поддерживающие стержни проходят через стены печи в специальных трубках и прижимаются к элементам с помощью пружинных винтовых нажимов. Контакт для температур обжига порядка 1200° С, показанный справа, охлаждается окружающим воздухом без

каких-либо специальных устройств. При температуре обжига около  $1500^{\circ}\text{C}$  применяется водяное охлаждение металлических частей контакта. Детали устройства видны на рис. 199 (слева).

Теплопроводность карборунда  $0,015\text{—}0,024\text{ кал/см/см}^2/\text{сек}$  при  $0^{\circ}\text{C}$ .

Теплопроводность шамотных огнеупорных масс колеблется в пределах  $0,0022\text{—}0,0027\text{ кал/см/см}^2/\text{сек}$ .

Керамические материалы, как правило, не являются проводниками электрического тока при низких температурах. При высоких температурах обжига их удельное электрическое сопротивление несколько понижается, что практически исключает возможность их при-

Огнеупорный материал

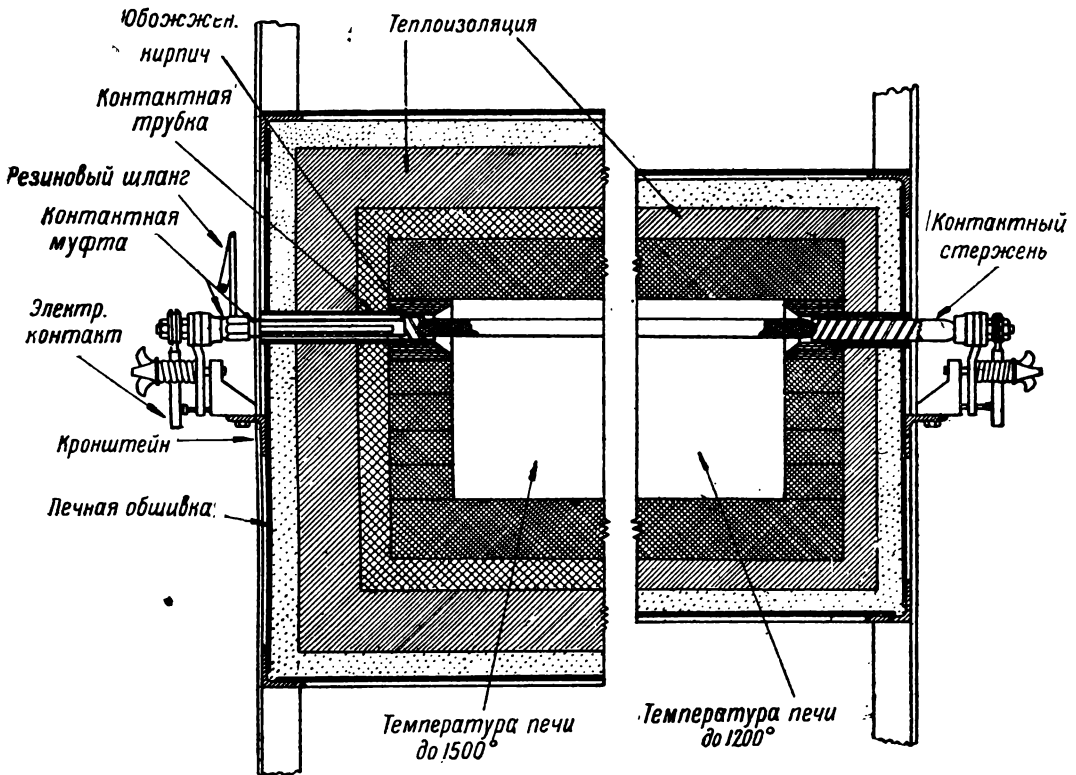


Рис. 199. Установка силитовых сопротивлений в электрических печах.

менения в качестве нагревательных элементов без примеси графита или карборунда. Поэтому наиболее широкое применение в электрических печах, работающих при высоких температурах, получили сопротивления в форме зерен или пластин и трубок разной формы, приготовленные из составов, в которых в качестве связки применяются керамические массы, а в качестве проводников с высоким сопротивлением — карборунд, графит и ему подобные углеродсодержащие материалы.

При подборе состава масс и проектировании нагревательных элементов больших размеров возникает ряд трудностей в смысле предупреждения их прогиба при высоких температурах и длительной непрерывной работе.

Фирма Morgan Co Ltd в Лондоне при изготовлении нагрева-

тельного элемента „Марганит“ пользуется рядом масс, состоящих из графита и керамических добавок, причем нагревательные пластины конструируются из нескольких слоев масс разных свойств и назначений.

Средний наиболее толстый слой имеет высокую механическую прочность и огнеупорность и богат керамическими добавками. Он необходим для устойчивости пластин в раскаленном состоянии.

Этот каркас с обеих сторон покрыт двумя слоями материала с преобладанием графита, защищенными, в свою очередь, более тонкими слоями огнеупорной массы, имеющей мелкозернистую структуру и покрытой глазурью.

Размеры нагревательных пластин определяются конструкцией печи, их количеством и требуемой теплоотдачей.

Элементы из „Марганита“ изготавливаются до 2,1 м длиной, 0,6 м шириной и 2,15 см толщиной и могут применяться при температурах до 1350° С. Изнашиваются эти элементы медленно. Срок их службы при непрерывной работе 50—70 дней.

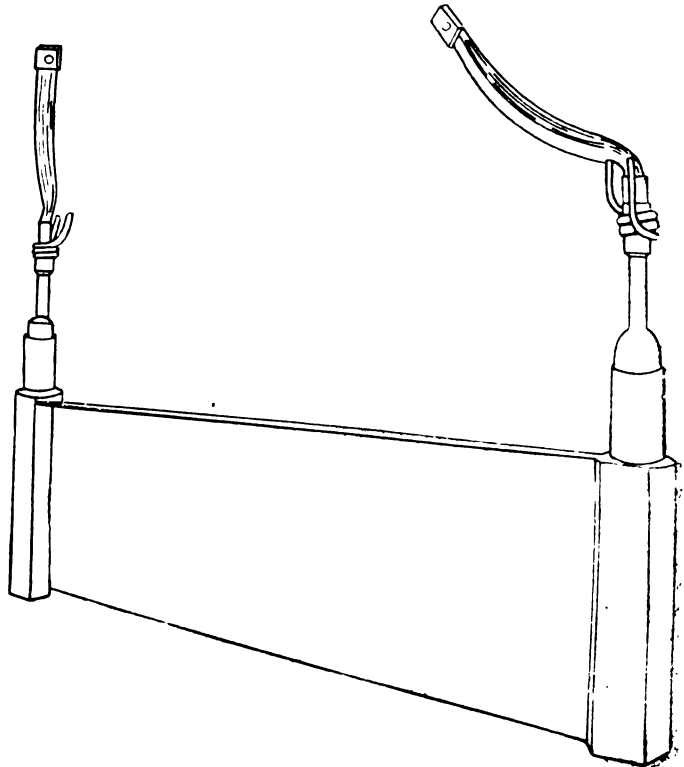
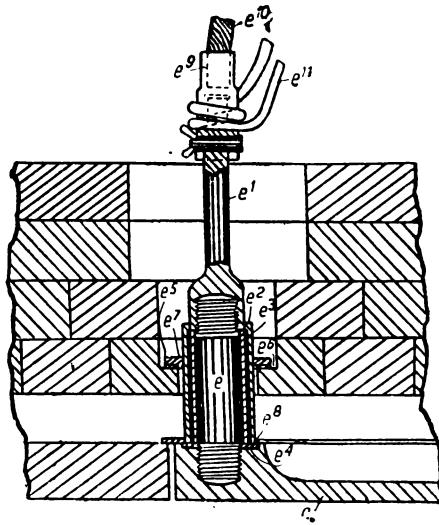


Рис. 200. Нагревательный элемент „Марганит“ и (вверху) конструкция контакта с водяным охлаждением при горизонтальном расположении пластинок.

По мере износа (выгорания графитного слоя), пластины делают тоньше, сопротивление их увеличивает. Выравнивание накала регулируется изменением вольтажа; наиболее выгодно пользоваться напряжением от 25 до 60 V.

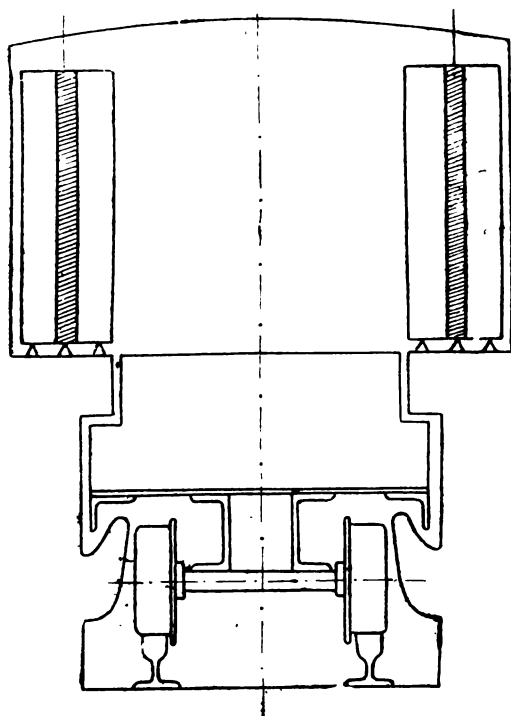
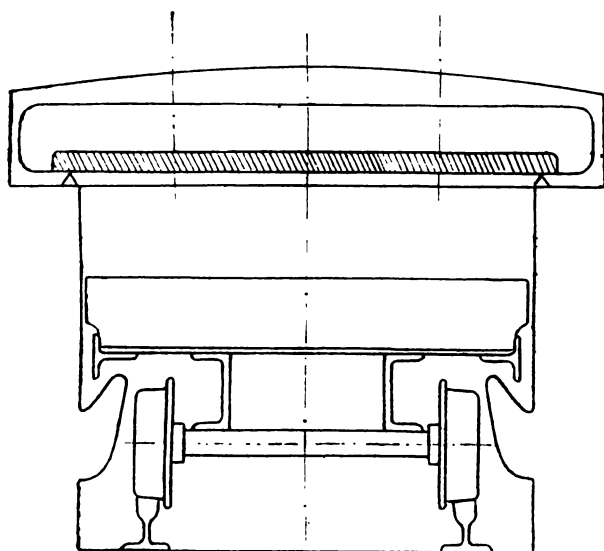


Рис. 201. Расположение нагревательных приборов (вверху — горизонтальные внизу — вертикальные).

В зависимости от теплового режима печи, фирма рекомендует нагружать марганитовые элементы от 2,5 до 5,5 kV на 1 кв. фут (0,09 м<sup>2</sup>) площади элементов. Подвод тока к нагревательному элементу при высоких температурах обжига является довольно сложной задачей.

Непосредственный металлический контакт не выдерживает температур нагрева элементов сопротивления до 1350° C. Поэтому в качестве промежуточного звена применяются графитовые стержни, закрученные в специальные гнезда нагревательного элемента. На рис. 200 этот стержень обозначен буквой *e*.

Графитовый стержень своей верхней частью, также на резьбе, соединяется хромоникелевой втулкой *e*<sup>1</sup>, присоединенной обычным зажимом к нормальным электрическим приводам *e*<sup>10</sup>.

Место присоединения хромоникелевой втулки к нормальным медным проводам охлаждается водой с помощью змеевика *e*<sup>11</sup>.



На графитовый стержень надеваются две керамиковых трубки  $e^2$  и  $e^3$ .

Наружная трубка покрыта глазурью, в целях предохранения графитового стержня от действия окислительной печной атмосферы.

Огнеупорная кладка печей, при нагреве до высоких температур обжига, становится полупроводником для электрического тока и вследствие этого не может служить опорой для нагревательных элементов.

Монтирование нагревательных элементов непосредственно на огнеупорной кладке вызвало бы большую утечку тока; поэтому опорные поверхности для подвешивания или установки элементов располагают на высококачественных изоляционных промазках, по возможности, выведенных из сферы воздействия высоких температур.

На рис. 201 схематически показано размещение элементов в горизонтальном и вертикальном положениях (разрез по элементам заштрихован).

Как видно из чертежа печи системы Ридгаммер (см. рис. 197, поперечный разрез), вертикальные элементы вводятся в зону каления туннельной печи снизу специальными подъемными устройствами, что позволяет с помощью огнеупорных подставок вывести изоляцию электродов вниз, где температура невысока и можно ожидать надежной службы изоляции и контактов, подводящих электрический ток.

В зависимости от размеров печи, температур обжига и других условий работы, в непрерывно действующих печах могут применяться также нагревательные элементы, используемые для печей периодического действия.

Для туннельных электрических печей, кроме обычного оборудования требуются специальные трансформаторы для понижения вольтажа электрического тока и контрольно-измерительные электроприборы нормальных типов.

Трансформаторы должны иметь в обмотках ряд ответвлений и переключатели, которые обеспечили бы широкую регулировку вольтажа в зависимости от требований, предъявляемых к обжигу, и от износа элементов, который сопровождается увеличением их сопротивления. Обычные пределы регулировки 25—100 V.

## **VII. Проблемы и перспективы использования электрического тока в обжигательных печах**

Электричество является одним из наиболее гибких видов энергии, так как может передаваться линиями высокого напряжения на большие расстояния и превращаться в местах потребления в световую, механическую или тепловую энергию.

Благодаря успехам электротехники и машиностроения, для промышленного и бытового применения созданы многочисленные машины и аппараты, весьма удобные в отношении регулирования и управления и позволяющие осуществлять передачу и превращения электрической энергии с малыми потерями. Применение электрического тока для нагревания находит в последние годы все большее и большее применение в разных отраслях промышленности. В металлургии электрические печи получили широкое распространение и дали возможность организовать специальную отрасль промышленности — электрометаллургию.

Чрезвычайно низкий коэффициент использования топлива в кера-

мических печах, наряду с успехами в деле использования электрического тока для нагревания в других областях техники, послужили поводом для проведения ряда работ по использованию электричества для обжига керамических изделий.

В целях выяснения основных проблем, возникающих в области керамической теплотехники, заслуживает внимание сравнительная характеристика обжига в пламенных печах и в печах с электрическим нагреванием.

Количество электрических печей, работающих в керамической промышленности, еще весьма невелико и вопрос об их использовании недостаточно изучен в техно-экономическом разрезе. Поэтому в данное время еще нет возможности окончательно установить область применения электрических печей в керамических производствах. Нагревание керамических изделий во всех известных до настоящего времени электрических печах производится, главным образом, за счет лучеиспускания нагревательных элементов, раскаленных электрическим током, и рециркуляции воздуха, принимающего участие в передаче тепла от нагревательных элементов к обжигаемым изделиям.

Сравнивая эти два метода нагревания керамических изделий, можно сделать следующие выводы.

1. При нагревании электрическим током с рециркуляцией постоянного объема воздуха в печной камере (или канале) нет потери тепла с отходящими газами. В пламенных печах эта потеря неизбежна, так как для сжигания топлива должен непрерывно подводиться воздух и также непрерывно должны отводиться дымовые газы. В современных лучших туннельных печах потеря тепла с отходящими газами доведена до минимума, но все же составляет около 15—20% от общего расхода тепла.

2. Элементы сопротивления, нагреваемые до белого каления электрическим током, при современном их материале и конструкции не выдерживают высоких температур порядка 1700—1800° С и в этих условиях весьма быстро изнашиваются. При более низкой температуре нагревательных элементов не удастся нагреть обжигаемые изделия выше 1250—1300° С.

Невысокая разница температур нагревательных элементов и обжигаемых изделий (100—200°) и слабая циркуляция воздуха в электрических печах являются причиной медленного прогрева массивных керамических изделий (огнеупорные изделия, высоковольтный фарфор и т. п.) и неравномерного распределения температуры по сечению камеры или вагонетки нормальных размеров. Поэтому современные электрические печи конструируются в виде туннелей с небольшим сечением канала (порядка 0,25—0,60 м<sup>2</sup>) и нашли применение только при обжиге фарфоровой и фаянсовой посуды, отжиге стекла, эмалировочных и других подобных работах.

Использование электрического тока крупных электроцентралей для обжига керамической продукции может освободить фарфоровые заводы от решения ряда сложных задач, возникающих при обжиге топливом.

Вопросы транспортирования топлива, его хранения и газификации, использования тепловых отходов при этом отпадают или разрешаются значительно проще и дешевле. Значительная стоимость электрической энергии в районах, где нет мощных гидроэлектрических станций, является крупной помехой для более широкого и форсированного внедрения электрического тока в керамическое производство.

При сравнении экономичности печей, отапливаемых твердым топливом, газом и электрическим током, можно руководствоваться калькуляцией стоимости обжига только в однотипных печах при аналогичном ассортименте. Сопоставление расходных коэффициентов по топливу и электроэнергии при обжиге изделий, дающих разный вес загрузки на 1 м<sup>3</sup> печного пространства или при обжиге аналогичной продукции, но в печах разных типов и объемов, приводит к противоречивым выводам.

Русс<sup>1</sup> сопоставляет эксплуатационные показатели работы печей, отапливаемых углем, газом и электрическим током и применяемых в эмалировочной промышленности, при температуре нагрева 800—950° С (таблица 62).

Таблица 62

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Наименование показателей	Печь отапливается каменным углем	Печь отапливается газом из бурого угля	Электрическая печь
Производительность в сутки в кг .	780	684	1 440—1 600
Расход электроэнергии в сутки в кв/час . . . . .	—	—	850—1 510
Расход угля (газа в пересчете на уголь) в сутки в кг . . . . .	780	650	—
Принятая при калькуляции (для данных местных условий) стоимость 1 т топлива или 1 kWh в условных единицах . . . . .	22	11,5	0,04
Расход угля в т или электрического тока в kWh на 1 т продукции .	1,00	0,95	945
Стоимость энергии на 1 т продукции в условных единицах . . . .	22	11	37,8

Виллах<sup>2</sup> приводит данные о показателях работы некоторых электрических туннельных печей. Так, Фирма Броун-Бовери дает для своих печей, предназначенных для закрепления красок на фарфоре и фаянсе, удельный расход электроэнергии 0,75 kWh на 1 кг изделий при отношении веса продукции к весу корзин 1:2.

Для противоточной туннельной печи того же назначения со встречными поездами — 0,4 kWh на 1 кг при отношении веса изделий к весу корзин 1:1,5.

Электрическая туннельная печь для обжига санитарного фаянса с выпуском в сутки 210 шт. умывальников нормальной величины расходует 1,24 kWh электроэнергии на 1 кг продукции.

Обжиг сан изделий производится без капсул (рис. 202), и потому в этом случае техно-экономические показатели работы печей более благоприятны, чем при обжиге изделий в капсулах. Последние весят в несколько раз больше, чем изделия, и поглощают соответственно большее количество тепла.

В конечном счете выбор между методом обогрева с помощью пламенных топок и с помощью электрических нагревательных приборов определяется относительной стоимостью угля или иного вида

<sup>1</sup> E. Fr. Russ. Der elektrische Emallierofen. „Sprechsaal“, № 17, 1934.

<sup>2</sup> H. Willach. „Allgemeine Glas und Keram. Industrie“, № 9, 1934.

твердого топлива и электроэнергии и может быть окончательно решен лишь с учетом всех эксплуатационных условий.

Разрешение вопроса заключается в изыскании систем и конструкций электрических туннельных печей с более высоким коэффициентом энергетического и эксплуатационного порядка, с меньшим расходом энергии на 1 т продукции и более высокой пропускной способностью установок.

Особого внимания заслуживают попытки обойтись без нагревательных элементов и перенести действие тока непосредственно на обжигаемые изделия.

В металлургии для плавки специальных сплавов и стали в последнее время начали применять электрические индукционные печи высокой частоты.



Рис. 202. Загрузка вагонеток электрической туннельной печи.

В индукционных печах нагревание металла производится путем возбуждения в самом металле переменного тока, чем устраняются промежуточные обогревающие элементы и достигаются идеальная чистота получаемого сплава и высокий эффект работы печей.

Использование этого метода для обжига керамических изделий имело бы большое преимущество перед всеми другими способами нагрева, вследствие устранения ряда потерь, происходящих в связи с медленным процессом передачи тепла изделиям и неравномерным прогревом загрузки вагонеток.

К сожалению, почти все керамические изделия являются непроводниками или полупроводниками с весьма высоким сопротивлением, и потому в них не могут индуктироваться токи, необходимые для нагрева до высокой температуры.

Кроме того, при электрическом индукционном обогреве неизбежно нагреваются индукционным током и все металлические части

вагснеток, замена которых материалами, непроводящими тока, наталкивается на ряд затруднений конструктивного порядка.

Некоторые высокоогнеупорные материалы, например: магнезия, окись циркония, борнитрид, при высоких температурах приобретают электропроводимость, достаточную для их обжига в индукционных печах.

Первоначальный разогрев до температур, при которых эти материалы имеют достаточную проводимость, производится с помощью тонкого слоя графита, покрывающего обжигаемое изделие и проводящего электрический ток при низких температурах.

Возможности обжига керамических изделий в индукционных печах недостаточно исследованы. Преимущественное применение эти печи могут иметь для обжига специальных высокоогнеупорных изделий при температурах выше  $1400^{\circ}\text{C}$ , когда остальные способы обжига становятся весьма дорогими, а задачи использования индукционных печей в значительной мере упрощаются.

В периодической литературе имеются указания на попытки комбинированного пламенного и электрического обжига.

Электрический нагрев выдвигается как дополнительный резерв для получения особо высоких температур в калильной зоне, когда их нельзя получить использованием одного лишь топлива.

Разнообразное и непрерывно расширяющееся применение керамических изделий в промышленности и повышение предъявляемых к ним технических требований, потребуют специальных условий обжига и новых типов печей, среди которых электрические печи на некоторых предприятиях окажутся наиболее эффективными.

---

## ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕЧНОГО ПРОСТРАНСТВА В КЕРАМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

#### 1. Загрузка печных камер и вагонеток перед обжигом

Подготовленный к обжигу полуфабрикат должен загружаться на вагонетку или в камеру в таком порядке, который обеспечит бы сохранение формы изделий, нормальную циркуляцию газов в просветах между изделиями (следовательно равномерный их обжиг) и возможно полное использование печного пространства.

При обжиге массивных изделий примитивной формы и не имеющих глазурного покрова, как например стрзительного и огнеупорного кирпича их укладка производится в прямую или косую решетку с соблюдением установленных проходов для пламени.

Нормы полезной загрузки и оставляемых пустот устанавливаются на основании тепловых расчетов или заводской практики, в соответствии с объемом печной камеры или сечением вагонетки и размерами изделий.

В таблице 63 приведены данные о нормах заполнения камер и оставляемых для циркуляции газов промежутках.

При обжиге тонкой керамики (фарфор, фаянс, каменная посуда и т. п.), недостаточно прочной в сыром виде и, по преимуществу, покрываемой глазурью, укладка изделий друг на друга невозможна и потому применяются специальные огнеупорные подставки, предохраняющие изделия от деформаций и склеивания при расплавлении глазури.

Практикуются два способа загрузки изделий — путем предварительной их укладки (заборки) в капсулы и путем непосредственного размещения на жестко установленном каркасе из огнеупорных фасонных камней (лещодок).

Капсулами называются разной формы шамотные открытые сверху коробки, которые при установке их друг на друга образуют закрытые со всех сторон небольшие камеры и предохраняют изделия от непосредственного воздействия пламени и дымовых газов.

Загрузка изделий на каркасе при бескапсельном обжиге имеет целью создать устойчивую опору для изделий и сохранить непосредственное и наиболее интенсивное омывание горячими газами поверхности изделий, улучшить теплопередачу и ускорить процесс обжига. Огнеупорный каркас обычно монтируется непосредственно в печной

## ЗАПОЛНЕНИЕ ПЕЧНЫХ КАМЕР ПРИ ОБЖИГЕ

Наименование продукции	Приближенные нормы		Примечание
	загрузка на 1 м <sup>3</sup> печной камеры в кг (по весу готовой продукции)	загрузка на 1 м <sup>3</sup> ставки на вагонетке туннельной печи в кг (по весу готовой продукции)	
Строительный красный кирпич . . . . .	900—950	—	250—300 шт.
Огнеупорный шамотный кирпич нормального размера . . . . .	—	850—950	В зависимости от сечения канала печи
Метлахские плитки . . . . .	—	480—500	—
Кислотоупорная каменная посуда . . . . .	57 и выше	—	В зависимости от ассортимента
Хозфаянс:			
а) бисквитный обжиг . . . . .	150—170	—	Ассортимент с преобладанием тарелок
б) политой сбжиг . . . . .	—	115	
Санитарный фаянс:			
а) бисквитный обжиг . . . . .	66	}	Ассортимент с преобладанием унитазов и столов
б) политой обжиг . . . . .	58		
Телеграфные фарфоровые изоляторы и др. . . . .	175—200	}	В зависимости от ассортимента
Чайная фарфоровая посуда:			
а) политой обжиг . . . . .	55—65		
б) утильный обжиг . . . . .	60—75		
Столовая фарфоровая посуда:			
а) утильный обжиг . . . . .	110—200		
б) политой обжиг . . . . .	70—80		

камере или на вагонетке из плит и фасонных камней с последующей укладкой изделий. Поэтому указанный метод загрузки получил наибольшее применение при обжиге крупных изделий, например, санитарного фаянса, умывальных столов, баков, керамических ванн и других подобных изделий (рис. 203).

Непосредственная загрузка камеры или вагонетки мелкими изделиями, ввиду большой трудоемкости этой операции, требует большого количества времени и потому целесообразно, для увеличения пропускной способности теплового оборудования, предварительно укладывать изделия в капсулы, загрузка которых в камеры или на вагонетки производится в короткое время небольшой группой обслуживающих рабочих.

Открытая (бескапсельная) загрузка применяется и для мелких изделий, которые устанавливаются на специальных этажерках для политого и бисквитного обжига тарелок и плиток. Эти этажерки по приемам загрузки и габаритам сходны с капсулами, но позволяют горячим газам непосредственно омывать установленные на них изделия (рис. 204).

Недостатком этих довольно сложных устройств является быстрая деформация отдельных деталей при высоких температурах, а также

недостаточная устойчивость и жесткость самой конструкции, что затрудняет их применение при ставке выше 1—1,5 м.

Неизбежная деформация фарфоровых тарелок в политом обжиге при подвешивании их на призмах в трех точках, а также дефекты глазурного покрова в местах соприкосновения с призмами, не позволяют в этом случае пользоваться этажерками, показанными на рис. 204.

Таким образом область применения открытых этажерок, по техническим условиям, ограничивается политым обжигом фаянса



Рис. 203. Загрузка изделий на каркасе.

и других, не деформирующихся в обжиге изделий и низким обжигом для закрепления красок как на фаянсе, так и на фарфоре.

Большим стимулом для внедрения открытых подставок при обжиге фарфора, фаянса и плиток послужило применение в керамической промышленности муфельных и электрических печей, в которых изделия обогреваются, главным образом, лучистой теплотой и естественной циркуляцией горячего воздуха.

При обжиге изделий в капсулах и относительно невысоком нагреве стенок муфель или нагреваемых электрическим током элементов сопротивления, нельзя через стенки капсулы быстро прогреть изделия до высокой температуры и тем обеспечить высокую продуктивность печей. Естественно, поэтому, что усилия конструкторов и теплотехников направляются в сторону сокращения до минимума вспомогательного огнеупорного припаса, мешающего быстрому прохождению тепла к изделиям.



В периодических печах с высокими камерами бескапсельный обжиг неприменим ввиду неустойчивости облегченных конструкций этажерок при высокой ставке столбов (достигающей 3—4 м).

На практике даже цилиндрические капсулы, имеющие весьма жесткую конструкцию, при высоких температурах фарфорового обжига (1350—1450° С) в нижних рядах не выдерживают нагрузки столбов, что служит причиной завалов и крупных убытков. Более благоприятные условия для бескапсельного обжига имеются при обжиге в туннельных печах, где высота ставки на вагонетках не превышает обычно 1,8—2 м.

Необходимо отметить, что толчки и качания вагонеток при передвижении их в канале могут свести к нулю преимущества бескап-



Рис. 204. Этажерка для бескапсельного политого обжига фаянсовых тарелок.

сельной загрузки, и потому необходимо, при переходе на бескапсельный обжиг, обеспечить плавное и совершенно спокойное перемещение вагонеток (сварка стыков рельс, плавная подача вагонов и другие подобные мероприятия).

Обжиг фарфоровых тарелок и блюдец в туннельных горнах может производиться на подставках, сходных с капсулами, но имеющих боковые вырезы в стенках и изготовленных из весьма огнеупорных материалов, так как малая и опорная поверхность стоек и большие напряжения от изгиба горизонтальной части требуют от припаса высокой механической прочности в нагретом состоянии.

Недостаточно стойкий припас неизбежно поведет к увеличению завалов, боя и слипшей фарфора и фаянса.

Для правильного решения вопроса о целесообразности того или

инного вида обжига (в капсулях или бескапсельного), необходимо учитывать все элементы калькуляции по обжигу и приготовлению огнеупорных припасов — капсулей, этажерок и т. п.

Повышение или понижение процента использования и загрузки печного пространства (камеры или вагонетки) при капсульном или бескапсельном обжиге определяет пропускную способность печей и всего завода и весьма существенно отражается на себестоимости продукции, так как расход топлива, ряд цеховых, общезаводских, амортизационных и других расходов весьма мало изменяются в абсолютных цифрах и почти обратно пропорционально отражаются на себестоимости 1 *m* готовой продукции с увеличением или уменьшением ее выпуска.

В зависимости от ассортимента изделий, конструкции и размеров применяемых капсулей или этажерок (при бескапсельном обжиге), получается колебание загрузки на 1 *m*<sup>3</sup> пространства.

При одинаковых качествах огнеупорных материалов и достаточно тщательной проработке конструктивных размеров капсулей и этажерок, разница в загрузке не может быть существенной.

Оставление двух или трех открытых сторон вместо сплошной стенки капсуля не дает еще возможности использовать эти проемы для загрузки изделий или сближения столбов. Поэтому в самом способе бескапсельного обжига нет предпосылок для более уплотненной загрузки.

В литературе часто приводятся сравнения разных способов загрузки с весьма различными коэффициентами использования печного объема, что рассматривается как следствие капсульного или бескапсельного обжига, тогда как в одном случае пользуются огнеупорным припасом нормальной толщины и размеров, а в другом — допущены весьма большие необоснованные запасы в размерах, — обстоятельства существенные, но не относящиеся к принципиальным отличиям капсульного и открытого обжига.

Вторым отличием этажерок и других типов каркаса бескапсельного обжига является его меньший по сравнению с капсулями вес. Удаление сплошных стенок и замена их поддерживающими колоннами действительно облегчает конструкцию и в этом отношении можно рассчитывать на сокращение расхода огнеупорных материалов, если облегчение каркаса не отразится на его оборачиваемости по сравнению с капсулями. Особую остроту этот вопрос приобретает при производстве фарфоровой посуды. Тонкие и легкие изделия, например чашки и чайники, загружаются в крупные толстостенные капсулы с весом, в 5—6 раз превышающем вес изделий.

Если в круглых горнах крупные массивные капсулы необходимы для устойчивости высоких столбов капсулей малого диаметра, то при обжиге в туннельных печах с плавным движением вагонеток массивность крупных капсулей теряет значение и нет нужды сохранять невыгодное соотношение между массой фарфора и вспомогательного припаса. Капсулы для тарелок, обычно, имеют весьма низкую оборачиваемость (2—3 оборота), что говорит о несовершенстве их конструкции.

Открытый обжиг возможен во всех случаях, когда в печи циркулирует чистая газовая среда — топочные газы, не загрязненные летучей золой, или горячий воздух. Открытый обжиг дает экономию в расходе тепла.

Уменьшение расхода тепла получается в связи с ускорением прогрева изделий, доступных непосредственному омыванию газами,

и сокращением периода теплообработки, а также и за счет уменьшения обогреваемой массы, если вес шамотных припасов уменьшился при переходе на бескапельный обжиг.

Это преимущество бескапельного обжига становится более существенным при высоких температурах обжига, когда невелик перепад температур от пламени к обжигаемой продукции.

В настоящее время вопрос ускорения обжига при устранении капселей еще не получил цифрового уточнения. Поэтому в отдельных практических случаях вопрос приходится пока решать экспериментальным путем.

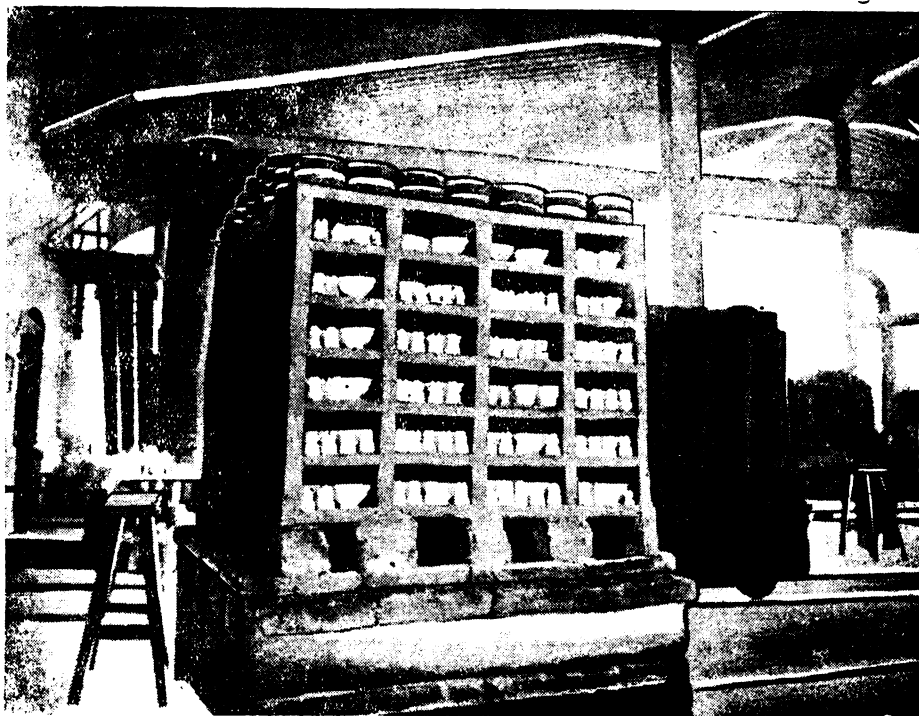


Рис. 205. Каркас из плит для бескапельного обжига.

Все техно-экономические подсчеты по сравнительной характеристике капсельного и бескапельного обжига не могут обойтись без учета изменений в качественном выходе продукции, а также боя и брака, — факторов, имеющих решающее значение в себестоимости выпускаемой продукции.

Кроме примеров удачного применения бескапельного обжига (обжиг санитарных изделий в туннельных печах), имеются также примеры непродуманного перехода на этот метод обжига.

Обжиг фарфоровой посуды в туннельных печах Хайтинского завода Сибфарфор в первые годы после их постройки проводился в обычных капселях. В дальнейшем завод начал загружать посуду на вагонетки для политого обжига на каркас, сложенный из шамотных плит и брусков на огнеупорной глине (рис. 144 и 205).

Размеры ячеек в каркасах рассчитаны на определенный ассортимент посуды; для крупных изделий применяются пяти- и шести-

полочные решетки, а для чашек и полоскательниц — семиполочные. Помимо 5—7 ярусов полок из шамотных плиток (лещодок), верхняя часть вагонетки загружается блюдами в обычных капсьюльках.

Бескапсельная или „лещодочная“ загрузка вагонетки, применяемая на Хайтинском заводе, как показали детальные расчеты, весьма невыгодна в эксплуатации и в этом отношении уступает обычной капсельной загрузке вагонеток. Основным недостатком этой конструкции является малая емкость вагонеток. Загрузка в среднем составляет 40—50 кг на 1 м<sup>3</sup>, что на 20—22% ниже нормальной капсельной загрузки для данного ассортимента посуды.

Слабое использование горнового пространства обусловлено неудачной конструкцией этажерки (огнеупорного каркаса), для которой применены плитки толщиной в 25—30 мм, что уже дает потерю используемого объема против капселя, имеющего толщину дна в 12—15 мм. Особенно большие потери кубатуры получаются при

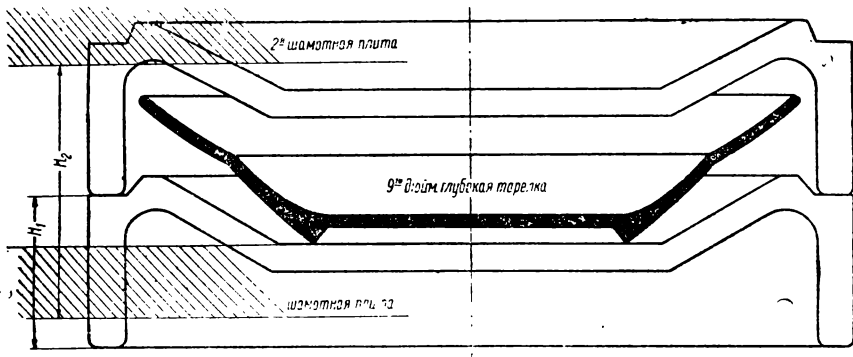


Рис. 206. Капсельная и каркасная загрузка тарелок.

загрузке на пластинках тарелок. В тарелочных капселях дно выгнуто вниз и помещается в резервуаре нижестоящей тарелки, благодаря чему достигается большое сокращение высоты капселя, как это показано на рис. 206.

На рис. 206 показан также способ размещения тарелок на каркасе, где они занимают гораздо большую кубатуру:  $H_2$  значительно больше  $H_1$ .

Для тарелок и блюдцев, при наличии предпосылок к внедрению бескапсельного обжига, нельзя пользоваться такой примитивной системой загрузки, и в этом отношении разработка конструкции индивидуальной подставки с вогнутым дном и открытыми боковинами по типу, показанному на рис. 204, несомненно даст более экономное использование кубатуры.

В общем, бескапсельная загрузка выгодна, когда имеется высокоустойчивый, малодеформирующийся при высоких температурах огнеупорный материал, позволяющий использовать легкие и все же достаточно устойчивые конструкции, удобные в сборке и загрузке изделиями, и когда обеспечен спокойный, плавный ход вагонеток внутри туннеля и на рабочих путях.

Значительные потери емкости вагонетки получаются в связи с частичным прогибом и разрушением отдельных плиток. Возникает необходимость из-за порчи нескольких ячеек разбирать весь каркас с потерей при разделении спекшихся плиток до 60% всего материала, или же пропускать его до полного износа с пустыми дефект-

ными ячейками. В обоих случаях получаются крупные потери в производстве.

Вес шамотовой этажерки — от 1627 кг для четырехполочной до 1700 кг для семиполочной, что составляет (исключая вес верхних капсулек и обжигаемого в них фарфора) около 1000 кг на 1 м<sup>2</sup> загрузки и 16 кг шамота на 1 кг загруженного фарфора, тогда как вес капсулей обычно превышает вес загруженной продукции в 4—5,5 раз.

Особо тяжеловесны поперечные бруски, на которые настилаются плитки (лещодки). При более тонких брусках каркас получается слабо устойчивым; несмотря на прочную перевязку каркаса спекающейся огнеупорной глиной, в этом случае он неизбежно перекашивается по ходу вагонеток.

В конструкции каркаса нет вертикальных плоскостей по длине вагонетки, которые могли бы обеспечить ее жесткость в этом направлении, и установка таких плоскостей неудобна, так как они затрудняли бы доступ к ячейкам каркаса для установки изделий.

В этом отношении капсули имеют несомненное преимущество, так как при относительно тонких стенках из них получаются система ставки, одинаково жесткая во всех направлениях.

Под влиянием высокой температуры шамотовые плитки даже при незначительной их нагрузке (например тонкостенными чашками) через два-три оборота прогибаются, что объясняется весьма невыгодным использованием шамота как материала. Пластины лежат на двух или трех опорах и работают на изгиб, не имея вертикальных ребер, тогда как в капсулях дно связано с вертикальными стенками и потому при меньшей толщине выдерживают те же нагрузки с меньшим прогибом.

Низкая огнеупорность шамотовых плиток также является одной из причин прогиба плиток. Однако, и при высоком качестве шамота, конструкция, построенная из плиток, в отношении веса и расхода шамота не может конкурировать с капсульной загрузкой.

Процесс загрузки посуды в ячейки при мелком ассортименте, даже при небольшой ширине вагонеток Хайтинского завода (1,5 м), имеет ряд неудобств. Ячейка для малых тарелок и низких чашек при нормальном использовании кубатуры настолько низка, что в нее с трудом проходит рука и осуществить правильное размещение тарелок и мелкой к ним приставки (ролики, игрушки) на глубине в 0,7 м почти невозможно. Вследствие этих трудностей, а также и предусматривая прогиб лещодок, высота делается с значительными запасами против высоты изделий, что весьма понижает коэффициент использования горнового пространства.

Быстрый нагрев изделий до конечной температуры, вследствие непосредственного их омыwania печными газами, — единственное преимущество лещодочной загрузки, по сравнению с капсульной.!

Печи Хайтинского завода отапливаются газом, причем условия столь благоприятны, что даже при недостаточной очистке газа не наблюдается никаких дефектов от непосредственного воздействия топочных газов на продукцию.

Верхний ярус вагонетки загружается блюдами в капсульках, благодаря чему теплопередача от раскаленных газов к изделиям здесь замедляется, в нижних же ярусах, благодаря циркуляции газов непосредственно у поверхности, теплопередача форсируется.

В туннельных печах температура у свода всегда выше, чем у пода вагонетки. Поэтому система ставки верха вагонетки

в капсулях и нижней части без них способствует более равномерному обжигу.

Для продукции, легко деформирующейся при небольшом повышении температуры обжига против нормальной, комбинированный способ загрузки вагонеток имеет несомненные преимущества, если невозможно выравнять температуру верха и низа до нужных пределов.

Эффект, получаемый в смысле возможного ускорения обжига изделий при бескапсельном обжиге, в разбираемом примере теряется, вследствие повышенного расхода тепла на прогрев большой массы шамота, превышающей вес капсулей, примерно, в три раза.

Отмеченные выше недочеты загрузки политой фарфоровой посуды на шамотовых плитках говорят о непригодности для подобного обжига фарфоровой посуды каркаса, постоянно установленного на вагонетке, а также и о большой сложности вопросов, возникающих при переходе на бескапсельный обжиг, и необходимости их всесторонней экспериментальной проработки.

Бескапсельный обжиг простых по форме изделий, например, плиток, осуществляется без затруднений. Дресслер<sup>1</sup> приводит (см. таблицу 64) сравнительные показатели для обжига двух типов: плиток в капсулях и без них на специальных подставках, на которых плитки подвергаются непосредственному воздействию горячих газов муфельного туннеля. Отдельные полки вмещают по 33 плитки размером 150 × 75 мм. Сопоставляется обжиг в туннельных печах с про-

Таблица 64

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОБЖИГА ПЛИТОК В КАПСЕЛЯХ И БЕЗ НИХ

	Для выпуска 500 м <sup>2</sup> плиток		Для выпуска 1000 м <sup>2</sup> плиток	
	обжиг на полках	обжиг в капсулях	обжиг на полках	обжиг в капсулях
Длина туннельных печей необходимая для заданного выпуска в м . . . . .	46,2	62,2	76,0	93,0
Число полок и капсулей, загружаемых в день в шт. . . . .	1 296	1 512	2 692	3 024
Число полок или капсулей в 1 вагонетке в шт. . . . .	108	84	108	114
Чистый вес полок или капсулей в 1 вагонетке в кг . . . . .	625	1 120	625	1 440
Чистый вес продукции в 1 вагонетке в кг . . . . .	750	460	750	630
Количество плиток, загружаемых на 1 вагонетку в м <sup>2</sup> . . . . .	44,5	27,3	45,5	37,5
Площадь пода вагонетки в мм <sup>2</sup> . . . . .	1 120 × 1 800	1 120 × 1 800	1 120 × 1 800	1 420 × 1 960
Высота загрузки вагонетки в мм . . . . .	980	1 290	980	1 565
Число выпускаемых вагонеток в сутки в шт. . . . .	12	20	24	29
Суточная загрузка вагонеток (плитки с капсулями или полками) в кг . . . . .	7 400	13 710	14 845	16 072
Суточный расход топлива (примродного газа) в м <sup>3</sup> . . . . .	13 800	25 700	28 200	46 000

<sup>1</sup> P. Dressler. „Cer. Industry“, № 2, 1930.

пуском в сутки: 1) около 500 м<sup>2</sup> плиток и 2) около 1000 м<sup>2</sup> плиток.

В той же статье приводится пример бескапсельного обжига плиток на одном из заводов в Нью-Йорке (в октябре 1928 г.).

Туннельный муфельный горн длиной в 45,6 м с суточным выпуском в 500 м<sup>2</sup> глазурованных плиток расходует в сутки около 1500 л нефти при выпуске вагонеток через каждые 2 часа.

Область применения разных способов открытого обжига взамен обжига в капсулах вряд ли может быть точно установлена при большом разнообразии видов керамической продукции и производственных условий. Можно считать установившимися лишь некоторые общие положения.

Бескапсельный обжиг неприменим, когда в топочных газах имеется много золы и пыли, могущих загрязнить глазурный покров, а продукция по техническим условиям не должна иметь следов от взаимодействия этой пыли с глазурью.

Хорошие условия для бескапсельного обжига тонкой керамики имеются при электрическом, нефтяном, газовом отоплении и в муфельных печах.

При пользовании кусковым топливом количество и летучесть золы, условия сжигания топлива, площадь решеток, форсировка и другие обстоятельства имеют решающее влияние на чистоту пламени. Пламя, несущее много золы, дает на глазури ряд специфических дефектов (задувку, матовые налеты, изменение цвета и др.).

Укладка изделий на предварительно установленный каркас в периодических печах занимает много времени, что приводит к уменьшению оборачиваемости и потому этот способ загрузки не может иметь практического применения.

Загрузка на каркас из полок может применяться лишь при обжиге весьма крупных изделий типа санитарного фаянса и для утильного обжига изделий, допускающих загрузку на полку стопками по 10—15 штук (тарелки, миски, блюда). Обжиг политых мелких изделий без капсул может оказаться выгодным, когда загрузка производится на открытые подставки комплектами, допускающими удобную транспортировку в пределах горнового цеха и устойчивыми в обжиге.

При этом сохраняются удобства и максимальная плотность загрузки с крупными преимуществами непосредственного контакта между изделиями и газами.<sup>1</sup> Всесторонняя конструктивная проработка применяемых типов капсул, в сторону их облегчения и открытия доступа горячим газам к изделиям, параллельно с использованием высокоогнеупорных капсульных масс открывают более широкие перспективы внедрения открытого обжига.

Намечающийся в ближайшие годы переход на туннельные печи с отоплением газом или нефтью послужит стимулом для коренного пересмотра установившихся конструкций капсул и методов капсульного производства.

## II. Методика исчисления полезной загрузки печей

Для облегчения рациональной эксплуатации печей и снижения удельного расхода топлива особого внимания заслуживает разреше-

<sup>1</sup> Опыты Университета в Огайо, США.

ние вопроса о правильном использовании печных камер путем более плотной их загрузки.

В главе шестой приведено общее выражение для экономического коэффициента полезного действия печей:

$$\eta = \frac{A}{B},$$

где  $A$  — тепло, израсходованное на нагрев обжигаемой в печи продукции, а  $B$  — общий расход тепла в установке со включением разных тепловых потерь.

Количество полезно освоенного тепла  $A$  определяется конечной температурой обжига, весом загруженной в камеру продукции и ее теплоемкостью.  $A$  растет пропорционально увеличению тоннажа загрузки печной камеры. Общий расход тепла  $B$  в керамических печах в большей мере определяется величиной тепловых потерь, чем полезным расходом тепла на обогрев продукции.

Особенно ярко подчеркивается преимущественное значение тепловых потерь в печах периодического действия, где эти потери достигают 95% общего расхода тепла. Абсолютная величина потерь, в основном, определяется системой и конструкцией печи и режимом обжига; увеличение загрузки печной камеры не дает значительного увеличения абсолютного расхода топлива, но резко уменьшает размеры тепловых потерь относительно повышающейся в этом случае доли полезно используемого тепла. Для иллюстрации проследим изменение коэффициента полезного действия печи при увеличении степени загрузки ее камеры, например на 20%, что практически осуществляется на многих заводах фарфоро-фаянсовой промышленности.

Коэффициент полезного действия печи

$$\eta = \frac{A}{B};$$

после уплотнения загрузки коэффициент полезного действия приобретает следующее выражение:

$$\eta_1 = \frac{A + \frac{20}{100}A}{B + \frac{20}{100}A},$$

и полезное использование и общий расход тепла увеличились на

$$\frac{20}{100}A,$$

что при низких значениях  $\eta$  дает резкое повышение коэффициента полезного действия.

Пример:

$$\eta = \frac{5}{100};$$

после уплотнения загрузки

$$\eta_1 = \frac{5 + 5 \cdot \frac{20}{100}}{100 + 5 \cdot \frac{20}{100}} = \frac{6}{101}.$$



Получается увеличение коэффициента полезного действия на

$$\frac{\eta_1 - \eta}{\eta} = \frac{\left(\frac{6}{101} - \frac{5}{100}\right) \cdot 100}{\frac{5}{100}} = 18,8\%$$

от первоначального его значения.

Увеличение коэффициента полезного действия в данном случае получилось почти пропорциональное увеличению загрузки печной камеры.

Совершенно естественно, что в такой же мере сокращается и удельный расход топлива на 1 т обжигаемой продукции, так как изменение общего расхода весьма невелико по сравнению с увеличением выпуска печи на 20%.

Технический эффект от уплотнения загрузки печного пространства получается более высоким в печах с низким коэффициентом полезного действия и, как видно из вышеприведенной формулы, меньшим в печах с хорошим использованием тепла.

Уплотнение загрузки на 20% в печах с коэффициентом полезного действия

$$\eta = \frac{30}{100}$$

дает по вышеприведенной схеме расчета

$$\eta_1 = \frac{36}{106}$$

Коэффициент полезного действия после уплотнения повысился на 13,2% против первоначального его значения.

Попутно необходимо отметить значительное уменьшение удельных расходов по эксплуатации теплового хозяйства. Например: амортизация оборудования, оплата обслуживающего и административно-технического персонала и пр.

Принимая же во внимание, что на большинстве заводов печи являются наиболее узким местом производства, требующим, как правило, наиболее крупных капиталовложений, необходимо учитывать и чрезвычайно крупный экономический эффект, который получается, когда завод без постройки новых печей и зданий, путем увеличения загрузки печного пространства, повышает выпуск продукции. В этом случае экономия получается по целому ряду элементов себестоимости (общезаводским, накладным, цеховым и другим расходам), вследствие повышения нагрузки предприятия в целом.

Исходя из указанных соображений, особое внимание должно уделяться использованию печного пространства и проработке новых способов загрузки продукции.

Мероприятия по уплотнению загрузки печей получили за последние годы большое развитие и применение в области тонкой керамики, где нагрузка на 1 м<sup>3</sup> камеры весьма невелика и колеблется от 50 до 150 кг, в зависимости от вида продукции.

Удачный подбор ассортимента в значительной мере предопределяет возможность использования выгодных комбинаций загрузки печей, обеспечивающих эффективное их использование. Практически разрешение этой группы вопросов в производствах тонкой керамики усложняется применением капсулей, являющихся до сих пор наиболее распространенным типом огнеупорного каркаса, поддерживающего

изделия в обжиге и предохраняющего их от деформаций. Наиболее выгодное заполнение печных камер получается в результате возможно более плотной установки капсулей в горне и при наиболее удачных комбинациях заполнения изделиями самого капсуля. Необходимость сохранения свободной кубатуры для проходов и каналов между капсулями, обеспечивающих нормальную циркуляцию топочных газов, ограничивает уплотнение ставки капсулей.

Этот минимум живого сечения камеры, оставленный для прохождения горячих газов, должен в каждом отдельном случае устанавливаться в соответствии с конструкцией печи, видом обжигаемых изделий и особенностями режима обжига и составляет обычно 30—40% всего печного объема.

При определении наиболее выгодных способов загрузки капсулей, необходимо пользоваться единообразными методами для подсчета занимаемых изделиями объемов и сравнения различных вариантов заполнения. Не вдаваясь здесь в детали, можно рекомендовать один из методов, практически достаточно проработанный и освещенный в печати. Сущность этого метода заключается в определении „капсельного и горнового объема“, занимаемого изделиями, и вычислении остальных необходимых в оперативной производственной работе показателей.

„Горновой объем“ определяется как часть пространства печной камеры, занимаемого изделиями вместе с капсулями и зазорами между последними и разделенного на вес изделий или количество их в группе.

В одном случае получаем весовой „горновой объем“ изделия  $V_p$  в  $m^3$  на 1 кг, в другом — поштучный „горновой объем“  $\frac{V}{N} = V_n$  в  $m^3$  на 1 шт.

Зная расход топлива на 1  $m^3$  горна, умножаем его на „горновые объемы“  $V_p$  и  $V_n$  и получаем данные о расходе топлива на 1 кг изделий и на 1 шт.

Умножая  $V_p$  и  $V_n$  на число штук или вес партии изделий, получаем необходимый объем горна для ее обжига.

При определении „горнового объема“ изделий приходится исходить из объема  $V_0$ , под которым подразумевается объем цилиндра, описанного по контуру изделия или группы их с плоскими основаниями верхним и нижним.

Для большей ясности и отделения вопроса о необходимых каналах между капсулями, как связанного с самим процессом обжига, устанавливается понятие о „капсельном объеме“  $V_1$ , который получается путем прибавления к объему  $V_0$  объема минимальных зазоров между периферией изделия и внутренней стороной капсуля, необходимых для прохождения рук при вкладывании изделий в капсулю, а также объема, занимаемого стенками капсулей.

Капсельный объем изделия нужно отличать от объема капсуля —  $V_2$ . В зависимости от способов укладки и соответствия размеров изделия и капсуля, разница между нормальным капсельным объемом изделия и объемом капсуля может колебаться в широких пределах. Фактический капсельный объем всей группы изделий совпадает с объемом капсуля, когда изделия не выступают за края капсуля и не требуют обечаек или дополнительных капсулей для накрывания.

Разделив объем  $V_1$  на вес или количество введенных в капсуль изделий, получим весовой и поштучный капсульный объемы:

$$\delta_p = \frac{V_1}{p}; \quad \delta_n = \frac{V_1}{N_1}.$$

В виде иллюстрации ниже приводятся материалы по изучению использования печного пространства при смешанном ассортименте.

Обследованием использования горнового пространства в горнах Кировского завода (б. Песоченской фаянсовой фабрики), вырабатывавшего в то время санитарный и хозяйственный фаянс, были выяснены цифровые характеристики отдельных изделий и капсулей; параллельно с этим выяснялось соответствие размеров и формы капсулей вырабатываемому ассортименту и целесообразность применяемых комбинаций различных изделий.

Все основные данные взяты с производства и вместе с соответствующими пересчетами собраны в отдельные таблицы. Эти таблицы послужили материалом для изыскания наиболее выгодных типовых комбинаций изделий и составления таблиц стандартных норм для руководства в работе горнового цеха.

В таблице 65 приведены данные о заполнении капсулей существующим ассортиментом фаянса, с учетом пустот, подлежащих использованию. Так как большинство фаянсовых изделий устанавливается в капсуль в виде групп, то по каждой единице ассортимента приведены данные как для 1 шт., так и для группы изделий.

В разделе, относящемся к капсулю, определились, кроме основных данных, вес капсуля на 1 кг загрузки и на 1 шт.

Далее приводятся цифры капсульных объемов для всей загрузки капсулей  $V_1$ , по которым легко могут быть вычислены  $\delta_p$  и  $\delta_n$  для 1 кг и 1 шт. изделий.

Горновой объем изделий получается умножением капсульного объема на определенный для каждого горна коэффициент, показывающий отношение суммарного капсульного объема изделий к емкости горна.

Этот коэффициент для бисквитных горнов б. Песоченской фабрики в период исследования загрузки камер равнялся, примерно, 0,45—0,50 (табл. 65).

Таблица 65

ЗАПОЛНЕНИЕ КАПСЕЛЕЙ ПРИ ПОЛИТОМ ОБЖИГЕ ФАЯНСА

№ горна	4	5	6	7	8
Объем капсулей в м <sup>3</sup> . . . . .	50,57	44,30	49,00	40,89	41,67
Объем горна в м <sup>3</sup> . . . . .	113,51	85,06	101,80	89,0	101,56
Коэффициент использования горнового объема капсулями . . . . .	0,45	0,52	0,48	0,46	0,41

Суммарный объем камер пяти политых горнов . . . . . 491,33 м<sup>3</sup>  
 Общий объем загруженных капсулей . . . . . 226,45 м<sup>3</sup>  
 Коэффициент использования горнового объема капсулями . . . . . 0,46

Таким образом получено два ряда цифр, характеризующих поштучный и весовой горновые объемы изделий  $V_p$  и  $V_n$ .

Эти цифры можно без каких-либо изменений использовать для расчетов в случае удовлетворительного заполнения капсуля одинако-

выми изделиями. В случае же значительных пустот, остающихся после заборки и заполняемых более мелкими изделиями, в таблице фиксируются размеры, форма и объем используемых пустот и процентное отношение этого объема ко всему внутреннему объему капсуля.

Последняя графа дает коэффициенты использования капсуля, показывающие отношение объема, описанного вокруг изделия, к внутреннему объему капсуля.

Путем составления таких таблиц и выбора наиболее выгодных комбинаций при заборке, устанавливаются нормы загрузки капсулей и ассортимент годовой программы, дающий наиболее эффективное использование печного хозяйства. В дальнейшем, по мере изменения ассортимента, таблицы должны дополняться новыми данными.

В соответствии с поставленными целями, в таблицах (см. таблицы 66 и 67) отмечаются все наиболее выгодные сочетания изделий, благодаря чему можно, пользуясь таблицами, установить наиболее выгодный порядок заборки. В первом разделе этих таблиц помещаются данные об основном ассортименте изделий, заполняющих капсуля.

Числовые характеристики определяются на основании таблицы 66. В том случае, когда основное заполнение капсуля составляют две группы разных изделий, данные по той и другой группе проставляются параллельно.

Второй раздел таблиц содержит аналогичные данные относительно загрузки используемых пустот, остающихся после укладки основной группы изделий.

Третий раздел таблиц содержит данные о „парциальных горновых объемах“ изделий при данном их сочетании и коэффициенты использования капсуля при комбинированной его загрузке. „Парциальные горновые объемы“ получаются делением общего горнового объема капсуля, заполненного данной комбинацией изделий, пропорционально „минимальным горновым объемам“ каждой группы изделий, входящих в данное сочетание:

$$\gamma_p = \frac{\gamma \times \gamma_{1 \min}}{\gamma_{1 \min} + \gamma_{2 \min} + \gamma_{3 \min} \dots}$$

где  $\gamma_{1 \min}$ ,  $\gamma_{2 \min}$ , ... — минимальные горновые объемы каждой группы одинаковых изделий, входящих в сочетание, а  $\gamma_1$  — комбинационные горновые объемы. Под минимальным горновым объемом группы изделий подразумевается тот, который получается в результате самостоятельной загрузки данной группы изделий в наиболее подходящий по размерам капсуль.

Введение понятия о „парциальных горновых объемах“ облегчает определение выгодности данного сочетания по сравнению с самостоятельным обжигом отдельных его составляющих, с чем иногда, в силу необходимости, приходится сталкиваться в эксплуатации печей.

Таблица 66 заканчивается графой коэффициентов использования капсулей различными сочетаниями изделий, которая позволяет выбрать из них наиболее выгодные.

При политем обжиге фарфора и фаянса возможности использования комбинированных загрузок ограничиваются необходимостью тщательного отделения одного изделия от другого (во избежание „слипышей“ — применение клинышков).

Вышеизложенная система проверки использования печных камер позволяет довольно точно установить стоимость обжига для данного

вида изделий, для чего отмечают в карточках: 1) расход топлива и обжиг очередного горна; 2) объем горна в  $m^3$ ; 3) горновой объем изделия в  $m^3$ .

На основании этих сведений, распределяются расходы по обжигу изделий пропорционально их горновым объемам.

При составлении предварительной калькуляции берутся средние данные о стоимости обжига 1  $m^3$  емкости горна и умножаются на соответствующие горновые объемы изделий.

Последовательный анализ использования печей, очевидная и крупная роль потерь, получаемых от неправильной загрузки, и общее стремление производителей к наиболее полному использованию печей привели к ряду интересных разрешений вышепоставленной задачи. Как видно из приведенных таблиц 65 и 66, наибольшие возможности для плотной загрузки капсул получают при бисквитном обжиге, где нет опасности склеивания изделий.

В виде примера укажем на два приема уплотнения загрузки фарфоровой и фаянсовой посуды в бисквитном обжиге.

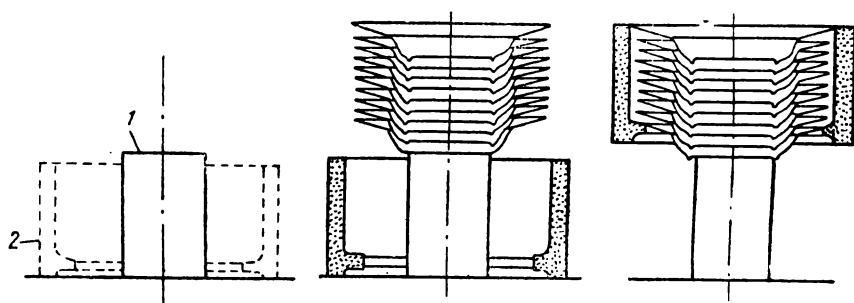


Рис. 207. Капсулы с вырезным дном.

В первом варианте загрузка тарелок производится с дополнительной подставкой блюдец, во втором (рис. 207) — загрузка одних лишь тарелок в вырезной капсель на специальной подставке; такая загрузка дает использование кубатуры, занимаемой дном капсулы, а также внутреннего объема верхней тарелки, расположенной в нижнем капселе.

На том же принципе основан способ загрузки умывальных фаянсовых столов в капсулах с вырезным дном, когда бисквитный обжиг их производится в круглых горнах, где нельзя использовать бескапсельный обжиг.

Укладкой нескольких тарелок и блюдец в чашу умывальника эффективность использования вырезных капсул повышается в еще большей мере, если есть возможность организовать выработку тарелок и блюдец в качестве дополнительной подставки.

Необходимо отметить, что возможность применения вырезных капсул и другие приемы уплотненной их загрузки являются значительным плюсом капсульного обжига при сравнительной оценке разных способов обжига.

Получение плотной загрузки капсул в политом обжиге, как было отмечено выше, встречает большие трудности из-за увеличения количества слипышей, получающихся на случайно соприкасающихся изделиях при оплавлении глазури.

Потери, получающиеся при увеличении боя и брака от слипышей, являются критерием возможности использования намечаемых приемов уплотнения загрузки печей.

ВОЗМОЖНЫЕ КОМБИНАЦИИ ЗАБОРКИ КАП

№ комбинаций	Основная группа изделий		Первая пустота			
	наименование, размеры и количество штук в группе	№ капсулы	горновой объем основной группы изделий в м <sup>3</sup>	объем пустоты в м <sup>3</sup>	заполнение пустоты	горновой объем изделий первой пустоты при самостоятельном заполнении капсул в м <sup>3</sup>
1	Тарелки 10" — 10 шт. . . . .	28	0,0178	0,0009	Блюдца — 3 шт.	0,0021
4	Миски 12" — 4 шт. . . . .	20	0,0250	0,0021	Блюдца — 10 шт.	0,0049
2	Миски 12" — 4 шт. . . . .	20 <sub>a</sub>	0,0216	0,0021	Блюдца — 10 шт.	0,0049
2	Кювета 26" × 32" = 1 шт.	35	0,0352	0,0061	Кювета 19" × 26" — 1 шт.	0,032
1	Вазы суповые № 1—2 шт.	95	0,0585	0,0030	Блюдца — 10 шт.	0,0057
2	Чаша суповая № 1—1 шт.	95	0,0399	0,0030	Блюдца — 5 шт.	0,0029
1	Умывальный стол № 1 — 1 шт. . . . .	35	0,1711	—	—	—
1	Унитаз 1 шт. . . . .	74	0,1544	0,0103	Блюдца — 15 шт.	0,0062
1	Писсуар мужск. № 2 — 1 шт. . . . .	95	0,0409	0,0023	Чашки — 3 шт.	0,066
1	Чашек 7 шт. . . . .	95	0,0104	0,0003	Баночки — 7 шт.	0,0009

Тем не менее, высокие температуры политого фарфорового обжига и большой расход топлива и средств на обслуживание печей (к тому же часто работающих с весьма низким коэффициентом полезного действия) являются серьезным стимулом для изыскания мероприятий к повышению использования печных камер и преодоления встречающихся трудностей.

Естественно, что и в политом обжиге разработано наибольшее число мероприятий в области полого фарфора, обжигаемого на кружках (бомзах), так как этот вид изделий дает наименьший тоннаж на 1 м<sup>3</sup> печной камеры и загружается в опрокинутом виде, что облегчает использование внутренних полостей.

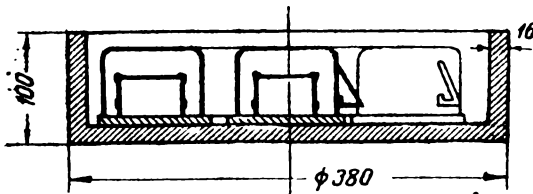


Рис. 208. Загрузка чашек с подставкой.

Элементарным приемом является применение кружка, имеющего несколько канавок для установки под крупные изделия одного или нескольких более мелких изделий, как это показано на рис. 208.

Довольно обширный ассортимент полых изделий и чрезвычайно большие количества выпускаемой на рынок мелочи (мелкие детали электроустановочного фарфора, фарфоровые пробки и т. п.) могут вполне обеспечить нормальную комплектную заборку полого бомзового фарфора и тем самым снизить удельный расход топлива, обычно весьма высокий для этой группы изделий. Помимо этого, при обжиге мелких полых изделий под крупными отпадают расходы на изготовление для них отдельных кружков при незначительном изменении конструкции общего кружка.

Использование пустоты в %	Вторая пустота				Элементы заполнения капсуля в данных комбинациях			Использование объема капсулей в %
	объем пустоты в м <sup>3</sup>	заполнение пустоты	горновой объем изделий второй пустоты при самостоятельном заполнении капсулей в м <sup>3</sup>	использование пустоты в %	горновой объем			
					основные группы изделий	изделия, заполняющие I пустоту	изделия, заполняющие II пустоту	
90	—	—	—	—	0,0157	0,0017	—	89
50	—	—	—	—	0,021	0,0026	—	78
50	—	—	—	—	0,0193	0,0024	—	90
67	0,0030	пепельницы № 240—2 шт. Баночки № 1—5 шт.	0,0014	50	0,0224	0,0115	0,0046	68
28	—	—	—	—	0,0508	0,0039	—	78
28	—	—	—	—	0,0373	0,0024	—	71
—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	0,1417	0,0099	—	83
70	0,0003	Баночки—3 шт.	0,0004	23	0,0408	0,0041	0,0006	78
23	—	—	—	—	0,0097	0,0014	—	—

Размещение мелкого ассортимента в зазорах, получающихся между рядом установленными крупными изделиями, очевидно, гораздо выгоднее, чем самостоятельный их обжиг, и указания на потери, вызываемые задержкой в загрузке капсулей, по нашему мнению, следует отнести скорее к неудовлетворительной организации производства, чем к неудобствам использования мелочи для подставки.

Стремление к сокращению балластного объема капсуля, состоящего из кубатуры дна капсуля, зазоров между верхними краями изделий и вышестоящим капсулем, привело к способу загрузки поллой фарфоровой посуды в два яруса.

Следует отметить два варианта разрешения этой задачи.

По первому способу (рис. 209) одна из чашек ставится в нормальном положении на дно капсуля и накрывается кружком видоизмененной формы, на который в опрокинутом виде устанавливается вторая чашка. Для большей устойчивости двухъярусной укладки, кружок должен с обеих сторон промазываться специальной массой с добавлением какого-нибудь клея. Экономический эффект этого способа загрузки выражается в том, что вместо двух капсулей применяется один, более высокий. Как известно, загрузка одного или двух рядов чашек в капсуль не оказывает заметного влияния на прогиб его днища, которое выполняется с большим запасом тол-

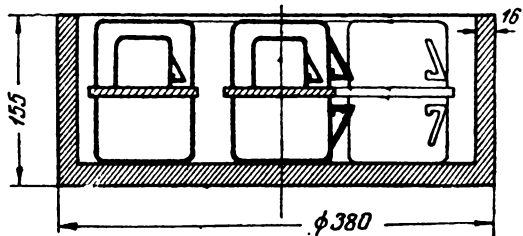


Рис. 209. Двухъярусная загрузка чашек с кружком.

щины. Последнее при легкой нагрузке рассчитывается, главным образом, на деформацию в обжиге под влиянием собственного веса.

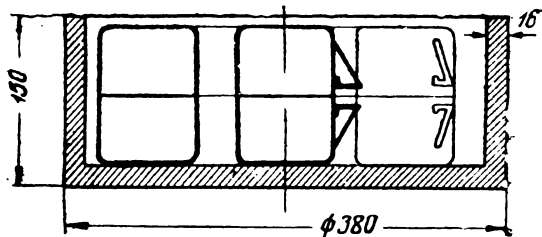


Рис. 210. Двухъярусная загрузка чашек без кружка.

Сравнивая загрузку двух капсулей в один ярус и двухъярусную загрузку одного высокого капсуля, нужно отметить следующие основные преимущества последней:

1) стоимость одного высокого капсуля ниже стоимости двух нормальных;

2) сокращение в два раза расхода кружков;

3) сокращение объема

камеры, необходимой для обжига заданного количества изделий, так как в кубатуре каждой двух капсулей устанавливаются лишь одно дно, один верхний зазор и один ряд кружков.

Нижняя чашка при этом способе загрузки требует дополнительной шлифовки. Подставка дополнительных мелких изделий в нижнем ярусе отпадает, а подставка под верхние чашки может повлечь деформацию нижних и потому не рекомендуется.

Вторым вариантом является двухъярусная загрузка чашек без промежуточного кружка путем предварительной склейки их по краю (рис. 210).

Третьим вариантом двухъярусной загрузки является остроумная замена кружков изделиями специального типа, выполняющими функции кружка и пригодными к использованию для разных целей в бытовой обстановке.

Изделия-подставки покрываются, за исключением ножки и бортов, на которых устанавливается основная загрузка капсуля, глазурью и выходят из обжига вполне пригодными для соответствующей декоративной обработки. Борты подставки должны иметь минимальные выступы, тщательную отделку и перед заборкой промазываться клеевой массой, во избежание сползания изделий с подставок. После обжига, борты подставок декорируются отводкой, которая после муфельного обжига дает гладкий край.

При наличии невысокой разницы в стоимости изготовления изделий-подставок и обычных кружков, при малой их высоте по сравнению с оформлением обычных кружков и при надлежащей организации сбыта подставок, которые можно использовать в виде блюдец для варенья и т. п., этот способ двухъярусной заборки капсулей можно считать одним из наиболее целесообразных приемов уплотнения загрузки.

Использование внутренней полости основной загрузки капсуля для установки внутри мелких изделий в данном случае невозможно, так как они будут приплавляться к глазурованной поверхности изделия-подставки, что нужно считать недостатком этого способа, как и в первом варианте двухъярусной загрузки.

Переходя к области технической керамики, нужно отметить ряд примеров хорошего разрешения затронутого здесь вопроса.

Обжиг фарфоровых и каменных изделий, не покрываемых глазурью или имеющих отдельные неглазурованные места, обходится дешевле, так как позволяет более выгодно использовать кубатуру печей.

Удачный подбор ассортимента и размеров колец наполнителей обеспечивает почти идеальное использование печей.



**ДАННЫЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГОРНОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ ПОЛИТОМ ОБЖИГЕ ФАЯНСА**

Изделие	Капсель						Горновой объем			Использование объёма капселя в %		
	наименование изделий или групп их с указанием количества в группе	вес изделий или группы их в кг	№ капселя	объем (внутренний) в м <sup>3</sup>	вес в кг	Вес капселя в кг		капсельный объем изделий	капселя и всего его заполнения		1 шт. изделий	1 кг изделий
						на 1 шт.	на 1 кг изделий					
Полукружки № 3												
3 шт. . . . .	0,66	} 7	0,02212	12,0	4,0	18,2	} 0,01837 0,00612	0,03858	0,01285	0,058	52	
1 шт. . . . .	0,22											
Блюдца-тазики												
20 шт. . . . .	2,40	} —	0,01066	9,5	0,47	4,0	} 0,01066 0,00053	0,02239	0,0011	0,0093	42	
1 шт. . . . .	0,12											
Тарелки глубокие 10"												
12 шт. . . . .	5,64	} 55	0,02597	17,5	1,45	3,1	} 0,0259 0,0021	0,05443	0,0045	0,0097	67	
1 шт. . . . .	0,47											
Миски обыкновен. 10"												
12 шт. . . . .	8,16	} 43	0,03769	21,0	1,7	2,6	} 0,0376 0,0031	0,07915	0,0066	0,0098	53	
1 шт. . . . .	0,68											
Тарелки кант. 10"												
12 шт. . . . .	5,52	} 55	0,02597	17,5	1,45	3,1	} 0,0259 0,0021	0,05454	0,0045	0,0098	64	
1 шт. . . . .	0,46											

Упразднение шамотовых штырей при обжиге телеграфных изоляторов дает большую экономию в стоимости капселей, удельном расходе топлива и при наличии гладкой поверхности дна капселей не вызывает понижения сортового выхода. Применение капселей с неровным дном не допускается, так как вызывает деформацию юбки изолятора.

При назначении программы для работающих предприятий и заданий при реконструкции и постройки новых заводов, подбор ассортимента продукции, обеспечивающего наибольшую производительность намеченных к эксплуатации печных агрегатов, является ответственной задачей, от разрешения которой, в значительной мере, зависит конечная стоимость выпускаемой продукции.

Примером удачного решения этой задачи можно считать один из вариантов ассортимента электрофарфора. В этот ассортимент, наряду с подвесными изоляторами высокого напряжения, входят телефонно-телеграфные изоляторы, что дает весьма выгодную групповую загрузку капселя, показанную на рис. 211.

В заключение необходимо отметить основные факторы, которые надлежит учитывать при выборе способов наиболее выгодного использования печных камер. Для обоснованных выводов обычно тре-

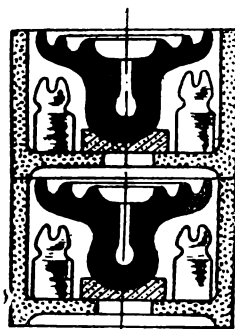


Рис. 211. Комбинированная загрузка подвесных и телеграфных изоляторов.

буется определение следующих показателей сравниваемых способов загрузки:

1) средняя стоимость обжига, отнесенная на 1 м<sup>3</sup> печной камеры или выпускаемых вагонеток (при туннельных печах);

2) горновой объем, необходимый для обжига 1 шт. или 1 кг продукции при нормальной для данного способа загрузке капсулей;

3) стоимость капсулей, фасонных огнеупорных деталей, подставок и т. п., падающая на обжиг 1 шт. или 1 кг продукции (с учетом их оборачиваемости — повторного использования);

4) стоимость загрузки капсулей и камер или вагонеток по каждому из сравниваемых способов;

5) потеря или экономия на изменении посортového выхода продукции;

6) влияние способов загрузки камер на усвоение тепла продукцией, скорость, режим и стоимость обжига.

Пользуясь вышеприведенной методикой и примерами, каждый техник и производственник может, сообразуясь с местными условиями производства, разработать нормали загрузки печей и организовать систематический контроль за их выполнением и правильный учет издержек по обжигу.

## ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ ПРОЦЕСС СУШКИ И УСТРОЙСТВО СУШИЛОК

### I. Задачи и методы сушки

Сушка полуфабрикатов и сырых материалов имеет крупное значение во всех отраслях керамической промышленности.

Конечной целью процесса сушки является понижение влажности сырья или полуфабриката до заданных пределов, обеспечивающих необходимые технические свойства.

Эта общая формулировка задач сушки в каждом случае конкретизируется в зависимости от первоначальных и конечных свойств высушиваемого полуфабриката в виде детально разработанных технических условий, определяющих в дальнейшем как методику сушильного процесса, так и конструкцию проектируемой или выбираемой сушильной аппаратуры.

Наиболее существенными элементами технологического задания на проектирование процесса и аппаратуры для сушки в области керамических производств являются следующие:

1) начальное состояние высушиваемого продукта или полуфабриката, т. е. его влажность, пористость, механическая прочность, теплоемкость, абсорбирующие свойства, усадка, минералогический состав и пр. характеристики;

2) конечное желательное состояние вышеотмеченных физических свойств и характеристик;

3) оптимальный режим сушки и ее скорость, обеспечивающие наибольший техно-экономический эффект, т. е. минимально возможный расход тепла, времени, механической энергии, эксплуатационных и капитальных затрат на оборудование при наивысшем качестве высушиваемого продукта и минимальном выходе брака.

Определение оптимального режима сушки часто является весьма сложной задачей, требующей совместной проработки ее технологами и теплотехниками. Установленный оптимальный режим сушки, даже в наиболее совершенных сушилках с гибкой регулировкой процесса, в производственных условиях не может обычно точно осуществляться, и потому вторым этапом проработки вопроса о сушке того или иного полуфабриката является установление такого производственного режима, который, отступая от намеченного оптимального, дает все же достаточно удовлетворительные результаты и кладется в основу окончательного задания для проектирования сушилок.

Процесс сушки глины или полуфабрикатов сопровождается их нагреванием и рядом других довольно сложных и недостаточно еще изученных явлений, протекающих внутри материала и обуславливающих качество готового высушенного продукта. Определенный режим прохождения внутренних процессов в высушиваемых полуфабрикатах устанавливается в сушилках путем соответствующего изменения состояния (температуры, влажности, давления и скорости движения) атмосферы, окружающей изделия.

В сушильной технике применяются два метода регулирования внешних (ведущих) условий сушки, связанные с различными принципами работы сушилок периодического действия и сушилок непрерывного действия.

В сушилке периодического действия камера заполняется полуфабрикатами, и все необходимые условия сушки получаются путем регулирования состояния окружающей их атмосферы. При этом способе сушки аппаратура, питающая сушилку теплом и обуславливающая циркуляцию сушильной атмосферы с изменением ее свойств в желательном направлении, должна работать с переменной нагрузкой, управляться опытным обслуживающим персоналом, в соответствии с показаниями контрольных приборов и установленными кривыми температуры и влажности.

В сушилке непрерывного действия в разных участках сушильного канала (камеры) устанавливаются на продолжительный срок, в соответствии с намеченным режимом сушки, все необходимые условия: температура, влажность, направление и скорость циркуляции сушильной атмосферы, а подлежащие сушке полуфабрикаты непрерывно проходят через сушильный канал или камеру с установленной скоростью. Таким образом переход высушиваемых изделий через отдельные зоны сушилки с различными характеристиками окружающей атмосферы является здесь ведущим фактором процесса сушки. При неизменных температурных и других условиях в разных зонах непрерывно действующей сушилки, режим сушки определяется лишь скоростью продвижения полуфабриката через сушилку.

В непрерывно действующих сушилках получается автоматический (конвейерные сушилки) или полуавтоматический процесс (в туннельных сушилках с вагонеточной загрузкой). Аппараты, питающие сушилку непрерывного действия горячим воздухом или паром, отрегулированные в период налаживания работы установки, в дальнейшем должны работать с неизменной нагрузкой и потому не нуждаются в специальном ежедневном управлении. Это составляет одно из крупнейших преимуществ сушилок данного типа.

Необходимо еще отметить, что приборы для автоматического поддержания температуры, давления и влажности воздуха и газов на постоянном уровне значительно проще приборов, регулирующих режим сушки по заданным кривым, и потому имеют широкое применение, устраняя зависимость работы сушилок от квалификации обслуживающего персонала. Отмеченные два принципа работы сушилок положены в основу многочисленных систем и конструкций.

Сушилки периодического действия, в которых происходит изменение условий сушки во времени, применяются в тех случаях, когда завод выпускает продукцию разнообразного ассортимента, не обеспечивающую полной загрузки непрерывно действующих сушилок однородными полуфабрикатами. Сушилка периодического действия, по самому характеру своей работы, требует специального ежедневного регулирования теплового режима в соответствии с особенно-

стями высушиваемых изделий, и потому частое изменение режима сушки при наличии квалифицированного технического персонала не представляет особых затруднений.

Сушилки непрерывного действия, имеющие неизменное тепловое состояние среды в отдельных зонах, находят широкое применение при массовом производстве изделий с одинаковыми формой, размерами и технологической характеристикой и, благодаря наличию ряда техно-экономических преимуществ, постепенно вытесняют сушилки периодического действия в указанной области. Высушивание в непрерывно действующих сушилках изделий разных размеров потребовало бы установления в них режима работы, необходимого для наиболее требовательных изделий, т. е. наименее выгодного по расходу времени, тепла и механической энергии, или же частой перестройки режима в соответствии с техническими требованиями разных партий полуфабриката, что связано с простоями сушилки и организационными затруднениями. При частом изменении режима работы непрерывно действующих сушилок, теряются их основные преимущества — автоматичность процесса сушки, устойчивость в работе и простота обслуживания — и сглаживается принципиальное различие в работе периодических и непрерывно действующих сушилок.

В качестве агентов сушильного процесса (тепло-и влагоносителей) применяются горячий воздух и дымовые газы.

Дымовые газы используются в сушилках для сушки глин, каолинов и ряда полуфабрикатов (кирпич, черепица и т. п.), не получающих дефектов от копоти и золы, вносимой с продуктами горения. Горячий воздух, получаемый при охлаждении обжигаемой в печах продукции, широко используется для сушки почти на всех керамических заводах. Водяной пар применяется для подогрева циркулирующего в сушилках воздуха с помощью калориферов разных систем, а также для увлажнения сухого воздуха в те периоды сушки, когда необходимо нагревать высушиваемые изделия с задержкой удаления влаги с их поверхности.

Для подогрева воздуха в калориферах иногда используется горячая вода, получаемая на заводах в виде отхода при охлаждении отдельных тепловых агрегатов (из конденсаторов паровых двигателей, от двигателей внутреннего сгорания и пр.).

В зависимости от метода использования агента сушки (влажного воздуха), различают сушилки однократного и многократного насыщения. В сушилках однократного насыщения горячий воздух омывает загруженные в сушильную камеру (или туннель) изделия, отдает тепло и, насыщаясь влагой, уходит из камеры сушилки в атмосферу.

Как видно из дальнейшего изложения, этот метод использования сушильной атмосферы является в большинстве случаев невыгодным и оправдывается лишь в некоторых непрерывно действующих сушилках.

В сушилках многократного насыщения воздух после работы в сушильной камере удаляется в атмосферу лишь частично; обладающая масса влажного воздуха вновь подогревается, разбавляется более сухим воздухом и возвращается в сушильную камеру. После отдачи тепла и поглощения паров воды часть воздуха вторичного насыщения также удаляется в атмосферу, а остальная часть возвращается в сушилку и т. д.

Целесообразность применения сушилок многократного насыщения (с рециркуляцией воздуха) вытекает из следующих соображений.

Техническая и экономическая эффективность процесса сушки или „коэффициент полезного действия сушки“ (в теплотехническом смысле, без учета других производственных факторов) определяется, по В. Е. Грум-Гржимайло, как соотношение между количеством тепла, унесенного с паром влажного воздуха, ко всему количеству тепла в паровоздушной смеси.

Этот „коэффициент полезного действия процесса сушки“ не следует смешивать с коэффициентом полезного действия сушилки, понятием более полно характеризующим работу сушильного агрегата как в части теплового процесса, так и в части всех теплопотерь, обусловленных конструкцией сушилки и другими производственными условиями.

Соотношение тепла, уносимого из сушилки паром, к общему теплосодержанию выходящей из сушилки отработавшей паровоздушной смеси, зависит от влажности воздуха, покидающего сушилку, и его температуры.

Из таблицы 68 видно, что, по мере увеличения влажности воздуха при постоянной температуре (55° С), увеличивается коэффициент полезного действия сушки.

Таблица 68

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ОТ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА, ПОКИДАЮЩЕГО СУШИЛКУ

Относительная влажность воздуха, покидающего сушилку (при температуре 55° С) в %	Теплосодержание в 1 м <sup>3</sup> смеси при общем давлении 1,0333 кг/см <sup>2</sup> и температуре 55° С в кал			Коэффициент полезного действия процесса сушки в %
	сухого воздуха	пара	всего	
10	13,559	6,114	19,673	31
20	13,345	12,303	25,648	48
30	13,133	18,567	31,700	58
40	12,919	24,906	37,825	66
50	12,705	31,320	44,025	71
60	12,493	37,869	50,362	75
70	12,279	44,433	63,172	78
80	12,065	51,107	63,172	81
90	11,986	57,785	69,771	83
100	11,639	64,573	76,212	85

При полном (100%) насыщении воздуха водяным паром получается наибольший коэффициент полезного действия сушки. Однако в производственных условиях не допускается столь высокое насыщение воздуха парами, из опасения оседания (конденсации) влаги на изделиях при малейшем снижении температуры паровоздушной смеси, что привело бы к порче высушиваемого продукта (так называемая „запарка“ и другие дефекты). Обычно воздух уходит из сушилок с относительной влажностью порядка 50—75%.

Между температурой уходящего из сушилок влажного воздуха при постоянной его влажности и коэффициентом полезного действия процесса сушки, как видно из таблицы 69 (стр. 384), также наблюдается прямая зависимость.

Повышение коэффициента полезного действия сушки с повышением температуры уходящего из сушилки влажного воздуха, кажу-

**ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ  
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ УХОДЯЩЕГО ВОЗДУХА**

Температура уходящего из сушилки влажного воздуха (внизу сушилки) $t_{\min}$ °C	Теплосодержание (в кал) 1 м <sup>3</sup> смеси при насыщении в 75%, общем давлении 1,0333 кг/см <sup>2</sup> и температуре $t_{\min}$			Коэффициент полезного действия процесса сушки в %
	сухого воздуха	пара	всего	
10	2,868	4,141	7,009	59
20	5,519	7,690	13,209	58
30	7,890	13,631	21,521	63
40	9,943	53,107	33,050	70
50	11,579	37,770	49,349	77
60	12,648	59,816	72,464	89
70	12,926	91,714	101,640	88
80	12,120	136,826	148,956	92
90	9,826	198,910	203,772	95

щееся на первый взгляд нелогичным, объясняется быстрым повышением влагоемкости воздуха с повышением температуры смеси.

Практически, в условиях работы сушилок однократного насыщения, в большинстве случаев не удается получить высокого насыщения воздуха парами и сохранить при этом высокую температуру паровоздушной смеси, покидающей сушилку. Это обстоятельство послужило одной из причин внедрения сушилок многократного насыщения, где повторный подогрев и возвращение влажного воздуха в сушильную камеру обеспечивают высокую влажность, температуру и высокий коэффициент полезного действия процесса сушки. Кроме того, при многократном возврате в сушилку отработанного влажного воздуха обеспечивается обмен в сушилке больших его объемов с невысоким перепадом влажности от входа в сушилку до выхода из нее, что дает постепенную и более равномерную сушку, чем в сушилках однократного насыщения.

## II. Классификация сушилок

В керамических производствах для естественной и искусственной сушки применяются устройства разных типов. При естественной сушке изделия, уложенные на полу или на стеллажах сушильного помещения, омываются естественными конвекционными, а также случайными потоками воздуха (ветер), без какого-либо искусственного регулирования температуры, влажности и скорости движения окружающей атмосферы. Естественная сушка не поддается регулировке, требует много времени и больших площадей и потому постепенно вытесняется искусственной сушкой, несмотря на более сложное устройство искусственных сушилок и довольно высокую стоимость последних.

Конструкция стеллажей для естественной сушки определяется размерами высушиваемых изделий и способом их укладки. Основные требования, предъявляемые к стеллажам, следующие: удобство и легкость обслуживания при их загрузке и разгрузке; наиболее экономичное использование кубатуры помещения, отведенного для сушки; обеспечение достаточных пролетов между изделиями для циркуляции

воздуха и, наконец, удачное размещение отдельных стеллажей в смысле транспортирования высушиваемых изделий.

При естественной сушке ответственных толстостенных изделий (например, стеклоплавильных горшков, крупных фарфоровых изделий и пр.) применяется закрывание их в начальный период сушки рогожами или полотном для предохранения от действия сквозняков, приводящего без указанной защиты к быстрому высыханию изделий с поверхности и к растрескиванию их.

Особенностью искусственных сушилок является наличие сушильной камеры, обособленной от помещения цеха, и устройства для регулирования температуры, влажности и обмена воздуха или дымовых газов, омывающих высушиваемые изделия.

Устройство и работа искусственной сушилки определяется следующими наиболее важными условиями:

1) заданным оптимальным режимом сушки и соответствующими этому режиму кривыми температуры, влажности, давления и скорости циркуляции омывающей изделия атмосферы; понятие „оптимальный режим сушки“ означает режим, при котором сушка протекает с наибольшим экономическим эффектом в смысле минимального расхода тепла и времени и минимальных потерь от выхода из сушки бракованных или неполноценных изделий;

2) наиболее приемлемой производительностью проектируемого агрегата в смысле увязки работы сушильных установок с остальными производственными процессами завода;

3) желательным способом загрузки и разгрузки сушилки (минимальный расход рабочей силы, обслуживающей сушилку);

4) данными о подлежащих использованию тепловых отходах завода: горячем воздухе, отработанном паре, а также и других источниках питания сушилки теплом;

5) дополнительными данными местного и специального порядка.

При чрезвычайно большом разнообразии типов и конструкций сушилок не представляется возможным описать все их разновидности, обусловленные как многообразием требований, предъявляемых к сушильным установкам, так и отсутствием типизации сушильного оборудования и часто малообоснованными стремлениями к внедрению новых конструкций, принципиально не отличающихся от уже известных и апробированных в производстве.

Кроме отмеченных выше основных различий в принципах работы, отдельные системы и конструкции сушилок имеют целый ряд других признаков, определяющих их устройство, в связи с чем трудно составить точную и в то же время простую схему классификации, которая охватывала бы все построенные сушилки, не говоря уже о неосуществленных проектах и патентах. Ниже приводится ориентировочная схема классификации сушилок по важнейшим признакам.

По принципу работы сушилки подразделяются на два класса: сушилки периодического действия и сушилки непрерывного действия.

*1. Сушилки периодического действия (камерные) подразделяются:*

1. По циклу использования воздуха в сушильной камере:

а) сушилки однократного насыщения,

б) сушилки многократного насыщения,

в) сушилки с использованием воздуха в замкнутом цикле (Бамаг-Мегуин).

2. По направлению воздушных потоков в сушильной камере:

а) сушилки с вертикальным нисходящим потоком воздуха,

б) сушилки с вертикальным восходящим потоком воздуха,



в) сушилки с горизонтальным направлением циркуляции,  
г) сушилки с переменным направлением воздуха (вверх — вниз или влево — вправо).

3. По способу подачи воздуха:

а) сушилки с распределением вводимого воздуха и распределенным отбором отработанного воздуха из разных точек камеры,  
б) сушилки с сосредоточенным подводом воздуха и таким же отводом отработанного.

4. По тепловой и производственной связи в работе камер:

а) самостоятельные камерные сушилки,  
б) блокированные камерные сушилки с производственной увязкой работы (сочетание циклов работы камер и рабочих смен цеха),  
в) блокированные камерные сушилки с взаимосвязанной циркуляцией воздуха.

5. По способу обогрева:

а) сушилки с паровым или водяным нагревом воздуха,  
б) сушилки, обогреваемые горячим воздухом охлаждающихся печей,  
в) сушилки, обогреваемые дымовыми газами,  
г) сушилки с комбинированным обогреванием (горячий воздух с промежуточным подогреванием и другие варианты).

*II. Сушилки непрерывного действия* классифицируются по тем же признакам, что и камерные сушилки, за исключением блокирования (пункт 4).

Кроме того, непрерывно действующие сушилки различаются по следующим специфическим признакам:

1. По направлению циркуляции воздуха и перемещению в сушилке изделий или материалов:

а) сушилки противоточные (встречное движение воздуха и высушиваемых изделий),  
б) сушилки прямоточные (движение материала совпадает с направлением потока воздуха).

2. По взаимной связи между отдельными зонами непрерывно действующих сушилок:

а) сушилки с независимой работой отдельных сушильных зон,  
б) сушилки со взаимосвязанной циркуляцией воздуха и взаимнозависимыми режимами работы отдельных зон.

Имеется ряд других признаков, например, способы рециркуляции (вентилятором, инъекцией), способы увлажнения воздуха и пр., не приведенные при классификации в целях упрощения схемы и выделения основных отличий, определяющих работу сушилок.

Одной из причин возникновения большого количества разнообразных конструкций является стремление конкурирующих фирм, занимающихся оборудованием сушилок в Западной Европе и США, угодить всем требованиям заказчика, часто недостаточно обоснованным, для удовлетворения которых приходится разрабатывать специальные конструкции вместо типовых, получивших достаточное применение. Накопление эксплуатационного опыта в области работы искусственных сушилок и типизация этого довольно дорогого оборудования является одной из основных задач, стоящих перед теплотехниками СССР.

В дальнейшем изложении приводится описание некоторых типов сушилок, получивших широкое распространение на керамических заводах в СССР и за границей.

### III. Камерные сушилки однократного насыщения

В сушилках однократного насыщения отработанный воздух удаляется полностью в атмосферу, и потому, в целях более экономного использования, удлиняется путь, проходимый воздухом между изделиями, что повышает степень его насыщения. Однако при длительном взаимодействии воздушного потока с высушиваемыми изделиями, последние омываются в разных участках сушилки воздухом с резко переменной температурой и влажностью, вследствие чего в каждой части сушилки имеют место разные режимы сушки.

Последнее обстоятельство вынуждает регулировать работу сушилки по участку камеры, находящемуся в неблагоприятных условиях, и тем самым удлинять период сушки и увеличивать расход тепла. Таким образом, в самой схеме работы сушилок однократного насыщения заложено противоречие, приводящее, при желании получить доброкачественный полуфабрикат во всех участках сушилки, к весьма высокому расходу топлива.

Сушилки однократного насыщения применяются, главным образом, для изделий, весьма нетребовательных к режиму сушки и допускающих значительные отклонения от установленных кривых температуры и влажности без ухудшения качества; например, для сушки глин и каолинов, гипсовых форм, некрупных и ответственных шамотных изделий.

Равномерное распределение воздушного потока между загруженными в сушилку изделиями и, следовательно, более равномерная сушка последних получаются в результате правильного подбора размеров камеры, размещения изделий на стеллажах (размеры зазоров между ними), направления воздушного потока, его скорости и ряда других обстоятельств.

Наиболее выгодная длина пути, проходимого горячим влажным воздухом, определяет размеры камеры в направлении движения воздушного потока. В остальных измерениях камерные сушилки могут иметь произвольные размеры, в зависимости от мощности и числа отдельных воздушных потоков. Так например, при разветвленном подводе горячего воздуха сверху вниз и отводе его внизу камеры, жестко фиксируемым размером является высота последней, так как верхние изделия омываются более горячим и сухим воздухом и тем самым создается нежелательное отставание в сушке нижних ярусов изделий. Ширина же и глубина камеры могут иметь произвольные размеры, какие являются наиболее удобными в смысле обслуживания и размещения сушилок в цехах.

При установлении размеров и производительности сушильных камер, обращается особое внимание на организационную увязку работы сушилок со смежными участками производства. Количество камер и график их работы должны быть рассчитаны таким образом, чтобы в рабочее время всегда имелось достаточное число камер на загрузке и выгрузке и в то же время простой камер на этих операциях был минимальным.

Размещение изделий на стеллажах и установление оптимальных размеров промежутков между ними для прохождения воздуха является довольно сложной задачей. Чем плотнее загружается сушилка, тем больше выпускается сухих изделий за один оборот камеры. Однако продолжительность сушки при уплотнении загрузки увеличивается, что приводит к обратному явлению — уменьшению выпуска в единицу времени. Вопрос о наибольшей производительности 1 м<sup>3</sup> сушилки

в единицу времени благоприятно разрешается при наиболее эффективном соотношении плотности заполнения сушилки и продолжительности сушки. Ограничением времени сушки является минимум, обусловленный технологическим заданием и обеспечивающий получение доброкачественных сухих изделий. Естественно, что дальнейшее увеличение зазоров между изделиями и скорости потока теряет смысл после достижения заданной продолжительности сушки. Вопросы оптимального заполнения сушильной камеры для отдельных видов керамической продукции еще не получили достаточного теоретического обоснования и разрешаются в процессе проектирования сушилок на основании данных практики и приближенных расчетов.

Крупную роль в создании равномерности обогревания и сушки отдельных изделий играет направление воздушного потока в сушильной камере. Горизонтальный поток воздуха с боковым впуском и отводом, по мере прохождения через камеру, вследствие неизбежного его расслоения, постепенно уступает свое место вертикальному и наклонному потоку. Более равномерную сушку можно получить при нисходящем движении воздуха сверху вниз или при подаче его снизу, с последующим подъемом вверх и обратным движением книзу у противоположной стены камеры. При надлежащем распределении впускных и отводящих отверстий, в сушилках последнего типа можно получить достаточно равномерную сушку по всем сечениям камеры.

Камерные сушилки однократного насыщения получили широкое распространение в производстве строительного кирпича, где для их обслуживания часто применяются так называемые келлеровские транспортные устройства. Специальной вагонеткой, имеющей подъемный механизм, доски с кирпичом-сырцом заводятся в камерную сушилку и укладываются на выступах, проходящих вдоль боковых стен сушильной камеры. Широкое применение стандартного келлеровского транспорта, в известной мере, привело к типизации камер современных кирпичных сушилок. Разнообразные их конструкции отличаются, главным образом, устройством каналов для подвода сухого воздуха и отвода влажного из сушильной камеры.

В виде примера ниже приводится схема камерной сушки однократного насыщения с подводом воздуха сверху вниз системы Наврата.

Воздух поступает в сушилку через расположенный внизу продольный канал и вертикальными проходящими в стенах каналами распределяется равномерно по всей длине камеры.

По мере насыщения влагой, воздух опускается через подовые отверстия, расположенные вдоль сушильной камеры, и через продольный воздухоотборный канал отводится в атмосферу.

В литературе по вопросам сушки<sup>1</sup> приводятся описания устройства и работы сушилок с различными схемами циркуляции воздуха в сушильной камере. Для изделий, предъявляющих повышенные требования к сушильному режиму, применяются сушилки более сложного устройства с широкими возможностями регулировки.

В камерных сушилках однократного насыщения для изделий, допускающих резкую сушку, применяется горячий воздух, получаемый при охлаждении печей. Массивные изделия (крупные шамотные камни, санитарный фаянс и т. п.) требуют в начальный период сушки прогрева во влажной атмосфере, во избежание образования корочки

---

<sup>1</sup> К. А. Нохратян. Искусственная сушка в керамической промышленности. 1934.

и трещин на поверхности. Увлажнение горячего воздуха, вводимого в сушилку, достигается параллельным впуском пара или тонким распылением воды с помощью специальных устройств.

По мере прогревания изделий и установления достаточно интенсивной влагопередачи от внутренних слоев изделия к наружным, увлажнение воздуха постепенно сокращается, и после удаления усадочной влаги (и прекращения усадки) сушка заканчивается воздухом с повышенной температурой и минимальной влажностью.

Единственным достоинством сушилок однократного насыщения является простое их устройство и невысокая стоимость. В отношении возможности регулирования процесса сушки, экономичности и удобства обслуживания, камерные сушилки однократного насыщения не могут конкурировать с камерными сушилками многократного насыщения и разными типами непрерывно действующих сушилок.

#### IV. Камерные сушилки многократного насыщения

Обоснование принципа работы сушилок многократного насыщения изложено в трудах проф. В. Е. Грум-Гржимайло.<sup>1</sup>

Разные конструктивные варианты сушилок этого типа широко используются во многих отраслях промышленности как в СССР, так и за границей, где их проектированием и постройкой занимаются такие фирмы, как Проктор и Шварц, Керрьер (США), и др. Сушилки многократного насыщения работают как с естественной циркуляцией воздуха, обусловленной разностью удельных весов подогретого и отработанного воздуха, так и с искусственной циркуляцией, побудителем которой являются вентиляторы или инжекционные устройства, присоединяемые к общему нагнетательному воздухопроводу. Сушилки с естественной циркуляцией имеют небольшие скорости воздуха, определяемые разницей температур подогретого и отработанного воздуха, и потому дают медленную сушку изделий. Кратность (повторность) насыщения рециркулирующего воздуха может регулироваться в широких пределах, благодаря чему в этих сушилках легко обеспечивается мягкий режим сушки при сравнительно небольшом расходе тепла.

В силу отмеченных особенностей, сушилки с естественной циркуляцией получили применение, главным образом, для медленной сушки изделий, требующих мягкого режима, например, крупных шамотных изделий (горшки и брусья стеклоплавильных печей, кислотоупорные изделия, изделия из фэйртона и т. п.). Для получения более быстрой сушки при малых скоростях воздуха приходится давать усиленный подвод свежего (сухого) воздуха и отвод отработанного для увеличения его влагоемкости. В этом случае сушилки многократного насыщения приближаются по рабочему циклу к сушилкам однократного насыщения с их неэкономным расходом тепла и неравномерностью сушки в разных местах камеры.

Сушилки многократного насыщения с естественной циркуляцией требуют устройства паровых калориферов и значительных площадей и потому в ряде отраслей керамической промышленности уступают место сушилкам с искусственной циркуляцией.

В сушилках с естественной циркуляцией последняя создается с помощью калориферов, выполненных в виде железных или чугунных труб, которые обогреваются топочными газами.

<sup>1</sup> В. Е. Грум-Гржимайло. Пламенные печи, ч. II, стр. 64—71. 1932.

Внизу сушильной камеры у двух противоположных стен расположены топки с двумя горизонтальными боровами, через которые топочные газы проходят в батареи труб и удаляются с паром в атмосферу. Нагревательные батареи отделены от стеллажей с высушиваемой продукцией стенами, не доходящими до потолка камеры. Внизу перегородок имеются окна для циркуляции воздуха от стеллажей к нагревательным батареям.

Воздух, нагреваемый боровами и батареями, подымается кверху и поступает в сушильную камеру на смену отработанному воздуху, более холодному и тяжелому: последний через окна перегородок поступает к нагревательным приборам, подогревается, подымается вверх, и т. д. до установленного процента насыщения водяными парами.

Степень насыщения циркулирующего в сушилке воздуха регулируется отводом влажного воздуха через дымовые трубы нагревательных батарей, сообщаемые с нижней частью сушильной камеры.

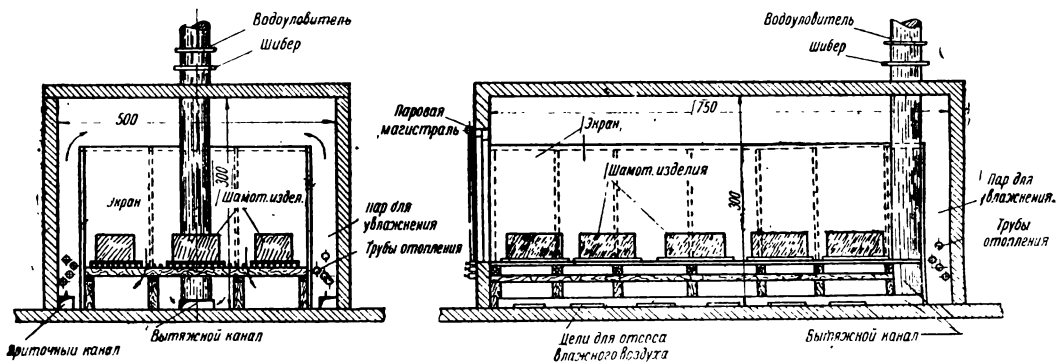


Рис. 212. Камерная сушилка с естественной циркуляцией воздуха.

Пополнение сушилки свежим воздухом происходит через каналы в стенах, расположенные на уровне нагревательных боровов.

На рис. 212 показана камерная сушилка с паровым отоплением и естественной циркуляцией воздуха, построенная для сушки шамотного припаса (стенной брус, стекловарные горшки). Приборы парового отопления сушилки размещены вдоль трех стен сушильной камеры и отделяются деревянными экранами от решетчатого пода, на котором укладываются высушиваемые изделия. В четвертой стене устроена герметическая дверь для загрузки и разгрузки камеры. Над обогревательными трубами расположена паровая труба для увлажнения воздуха в начальный период сушки.

Свежий воздух поступает по двум горизонтальным каналам, расположенным под нагревательными приборами вдоль стен сушилки.

Подогретаемый воздух вытесняется вверх более холодным и тяжелым воздухом сушильной камеры, который опускается, омывая шамотный брус, и проходит в направлении стрелок (см. рис. 212) через нижние отверстия экранов под нагревательные приборы.

Побудителем циркуляции воздуха является разность нагретого и охлажденного воздуха. За счет этой разницы преодолеваются сопротивления подовой решетки поворотов и др. Часть отработанного воздуха отводится в атмосферу через горизонтальный канал с равномерно распределенными отверстиями, расположенный на полу посре-

дине сушилки, и через дымовую трубу. В трубе имеется шибер для регулирования отбора воздуха и кратности (повторности) его использования в сушилке.<sup>1</sup>

Процесс удаления усадочной влаги из массивных шамотных изделий (камни для вагонеток туннельных печей и подвесных сводов) производится при температуре порядка 40 °С и относительной влажности порядка 80% и требует, примерно, 70% времени, затраченного на всю сушку.

Во второй части процесса удаляется остальная влага при температуре порядка 60 °С и пониженной влажности воздуха, чем достигается снижение остаточной влажности до 2—3%.

Опыты завода оптического стекла в Ленинграде по сушке шамота в искусственных сушилках многократного насыщения с естественной циркуляцией показывают следующие сокращения сроков сушки по сравнению с продолжительностью естественной сушки в заводских помещениях без регулирования температуры и влажности воздуха (см. таблицу 70):

Таблица 70

Наименование изделий	Производительность сушки в естественных условиях (средние данные)	Опытная сушка в сушилках многократного насыщения
Стекловарные горшки . . . . .	6 мес.	2 мес.
Стеновой брус . . . . .	6 "	41 день
Пять мостовых брусьев . . . . .	5 "	50 дней

Эти данные могут использоваться и при сушке шамотных изделий, применяющихся на фарфоро-фаянсовых заводах для ремонта печей, а также ванн из фойертонна.

Наибольшие трудности и связанные с этим повышенные эксплуатационные расходы имеют место при сушке массивных изделий сложной формы, например стекловарных горшков.

Сложная форма изделия создает неодинаковые условия для омывания отдельных элементов его горячим воздухом, что приводит к неравномерной сушке отдельных частей, к напряжениям и трещинам. В результате исследований и опытов, проводимых на заводе оптического стекла в Ленинграде инж. В. Н. Зиминым,<sup>2</sup> выявлено большое значение температурного градиента, получающегося в теле черепка, для продвижения влаги к поверхности и обеспечения равномерной и быстрой сушки ответственных изделий с минимальным браком. Последние сведения о результатах продолжающихся опытов сушки шамота позволяют ожидать сокращения длительности сушки стекловарных горшков до 15—30 дней. Это является крупным достижением в области ускорения производственного процесса, экономии площадей, занимаемых сушилками, и сокращения производственных издержек.

Сушилки многократного насыщения с искусственной циркуляцией могут обогреваться: паровыми или иными (например электрическими) подогревателями, горячим воздухом или комбинированным способом — паровыми калориферами и горячим воздухом. На рис. 213

<sup>1</sup> П. А. Калинин. Современная сушка шамотных изделий. „Гутта и горн“, № 1, 1932.

<sup>2</sup> По докладу в Теплотехническом секторе ВНИИК.

показана конструкция сушилки с паровым обогревом и увлажнением воздуха в начальный период сушки, предлагаемая фирмой Бенно-Шильде для высушивания разных керамических изделий.

Как видно из плана и разрезов, подвижные или стационарные стеллажи с сырыми изделиями размещаются в два ряда, и, таким

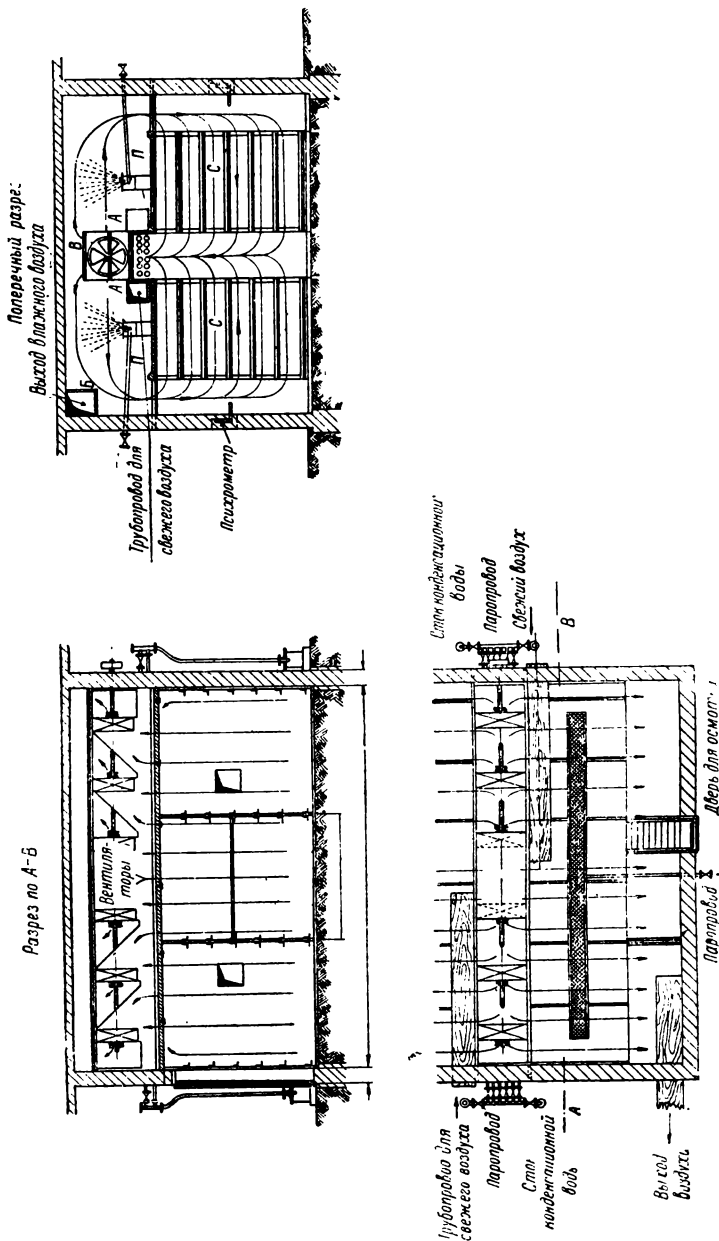


Рис. 213. Сушилка многократного насыщения системы Бенно-Шильде.

образом, получается три пролета благодаря чему обеспечивается равномерное распределение подводимого к изделиям воздуха. Отработанный воздух из среднего коридора отсасывается вентилятором через батарею ребристых паровых труб, где подогревается до температуры, требуемой по заданной кривой сушки, и подается в боко-

вые коридоры сушилки, из которых проходит через стеллажи с высушиваемыми изделиями в средний коридор и отсюда опять направляется в паровой подогреватель и т. д., повторяя цикл несколько раз.

Для увлажнения воздуха в начальный период сушки, когда омывание изделий сухим горячим воздухом повело бы к образованию трещин, над стеллажами у выхода подогретого воздуха из вентиляторов устроены пульверизаторы для распыления воды. Вода, не превратившаяся в пар в струе воздуха, падает в корыто, расположенное над стеллажами и постепенно испаряется за счет тепла циркулирующего воздуха.

После прогрева изделий по всей толще черепка, увлажнители воздуха выключаются и постепенно открываются каналы для под-

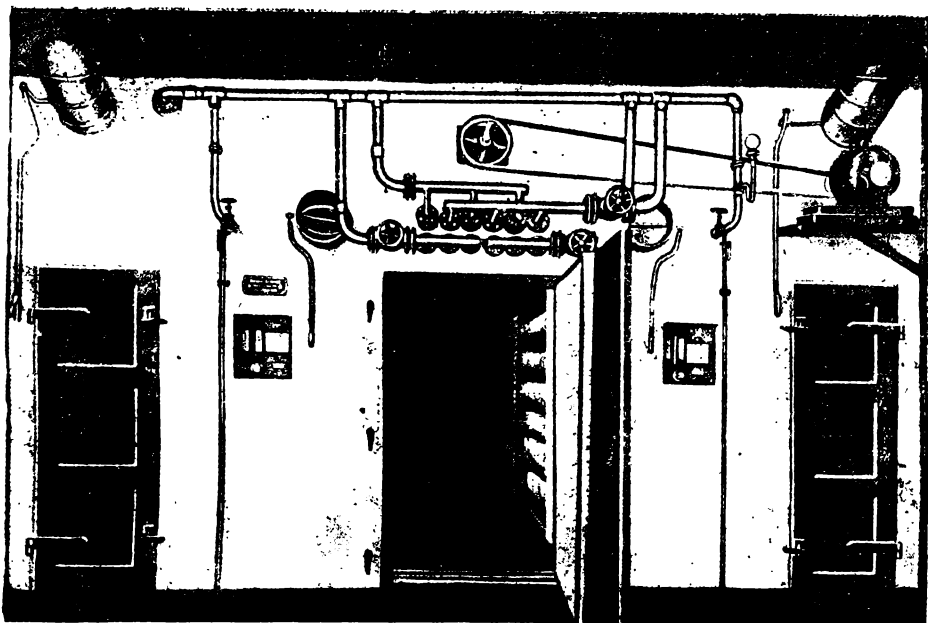


Рис. 214. Контрольная и регулирующая аппаратура сушилки системы Бенно-Шильде.

вода свежего воздуха и отвода отработанного влажного. Регулируя шиберами подвод свежего воздуха, отвод отработанного и подачу пара в нагревательные батареи, можно достигнуть в этой сушилке любой температуры и влажности воздуха в определенные периоды, т. е. добиться выполнения намеченного режима сушки. В данной конструкции фирма применяет систему винтовых вентиляторов, насаженных на один вал и обслуживающих самостоятельно отдельные участки сушильной камеры.

Эта система позволяет строить длинные камеры и обслуживать одной вентиляционной системой ряд камер при секционном их размещении, а также дает равномерный воздухообмен по длине камер. На рис. 214 и 215 показаны внешний и внутренний вид камеры, загруженной высоковольтными фарфоровыми изоляторами.

Если в описанную сушилку по окончании первого периода сушки



(весьма влажным воздухом) подводить через трубопровод горячий воздух и частично или полностью выключить паровые подогреватели, то получим так называемую комбинированную паровоздушную сушилку. Этот тип сушилок дает большие возможности регулирования режима сушки с утилизацией горячего воздуха, получаемого в больших количествах при охлаждении керамических печей.

Сушилки, обогреваемые лишь одним горячим воздухом, не имеют широких регулировочных возможностей паровых сушилок, так как питание теплом за счет подвода больших количеств горячего воздуха не позволяет создавать необходимые условия влажности, вследствие вынужденного большого воздухообмена, определяемого температурной кривой сушки. С подводом больших масс воздуха связана и необходимость удаления соответственных количеств отработанного воздуха, что приводит к снижению кратности насыщения и экономичности сушки.

Изложенные обстоятельства позволяют с достаточным экономическим эффектом использовать воздушные сушилки лишь для сушки изделий, которым прогрев во влажной атмосфере не нужен или проходит достаточно быстро. В сушилках с искусственной циркуляцией и воздушным обогреванием успешно высушиваются не крупные изделия с тонким пористым черепком или с небольшой усадкой.

Особую группу составляют воздушные сушилки, в которых рециркуляция воздуха и многократное насыщение достигаются путем инжекции отработанного воздуха струей свежего горячего воздуха, подаваемого в сушилку через сопла специальной конструкции. Регулирование режима сушки в этом случае происходит в узких пределах. Количество подаваемого горячего воздуха, определяемое желательной скоростью и температурой сушки, в свою очередь определяет влажность атмосферы и кратность насыщения воздуха в сушилке. Кроме того, регулирование скоростей циркуляции воздуха в сушилке тесно связано с количеством горячего воздуха (побудителя циркуляции), подаваемого в разные периоды сушки.

Область применения сушилок, работающих на горячем воздухе с искусственной циркуляцией, ограничивается сушкой несложных и мелких изделий, нетребовательных к режиму сушки.

В виде примера приводим описание и выдержки из расчета



Рис. 215. Размещение электрофарфора в сушилке многократного насыщения.

сушилки для гипсовых форм, обогреваемой горячим воздухом фарфоровых горнов.<sup>1</sup>

Сушилка состоит из четырех независимо работающих камер, объединенных в один блок, который обслуживается общей вентиляционной установкой, выполненной на отдельной площадке рядом с сушильными камерами (рис. 216).

Размеры камер (внутри): длина — 4,3 м, ширина — 2,8 м, высота — 2,6 м.

Камеры загружаются гипсовыми формами, уложенными на передвижные стеллажи (клетки) 1, имеющие 0,9 м в длину, 0,85 м в ширину и 1,85 м в высоту.

Стеллажи, загруженные формами, подвозятся в сушилку из литейной специальной вагонетками с подъемными платформами. В каждой камере устанавливается по 8 стеллажей.

Стены сушилки имеют двухстороннюю досчатую обшивку по деревянному каркасу с теплоизолирующей засыпкой; перекрытие тоже деревянное, с изолирующей засыпкой. Изнутри сушильные камеры оштукатурены известковым составом и покрыты влагоизолирующим слоем. Двери 2 размещены в торцевых стенах камер и выполнены в виде железных рам, обшитых досками.

Продолжительность сушки, на основании экспериментальных работ Всесоюзного керамического института, установлена, в зависимости от размеров форм, в пределах от 8 до 24 часов при максимальной температуре порядка 70° С.

Сушка рассчитана на загрузку всех камер в одну рабочую смену и полный цикл работы камер в течение 24 часов.

Сушилка обогревается горячим воздухом, получающимся при охлаждении расположенных рядом круглых фарфоровых горнов. Подача воздуха производится вентилятором 3 через железный распределительный воздуховод 4, расположенный на потолке сушилки по вертикальным стоякам 5, опускающимся слева у боковых стен каждой камеры и рядом с загрузочной дверью. Горячий воздух распределяется вдоль камеры с помощью горизонтальной, расположенной на полу, прямоугольной трубы 6, имеющей выходные щели с размерами, возрастающими по мере удаления от вертикального стояка.

Воздушные струйки поднимаются в левой части камер, омывают размещенные на стеллажах формы и отводятся книзу в правой части сушильной камеры, где на полу расположены воздухоотводные горизонтальные трубы 8, аналогичные по устройству с распределительными. Стояки для отвода влажного воздуха 9 размещаются в правом заднем углу каждой камеры и сообщаются с двумя магистральными трубами; с помощью трубы 10 отработанный в сушилке воздух отводится в атмосферу, а с помощью рециркуляционной трубы 11 может в любой пропорции примешиваться к горячему воздуху, который засасывается вентилятором 3 и подается в сушилку.

Работа сушилки регулируется шиберами. При полном перекрытии рециркуляционного воздуховода, весь влажный отработанный воздух выбрасывается в атмосферу, и сушилка работает по принципу однократного насыщения. В этом случае температура горячего

---

<sup>1</sup> Проект составлен сушильной группой Проектстеклофарфор под руководством инж. Ковельмана и инж. Каганский для реконструкции Дулевского фарфорового завода имени „Правды“.

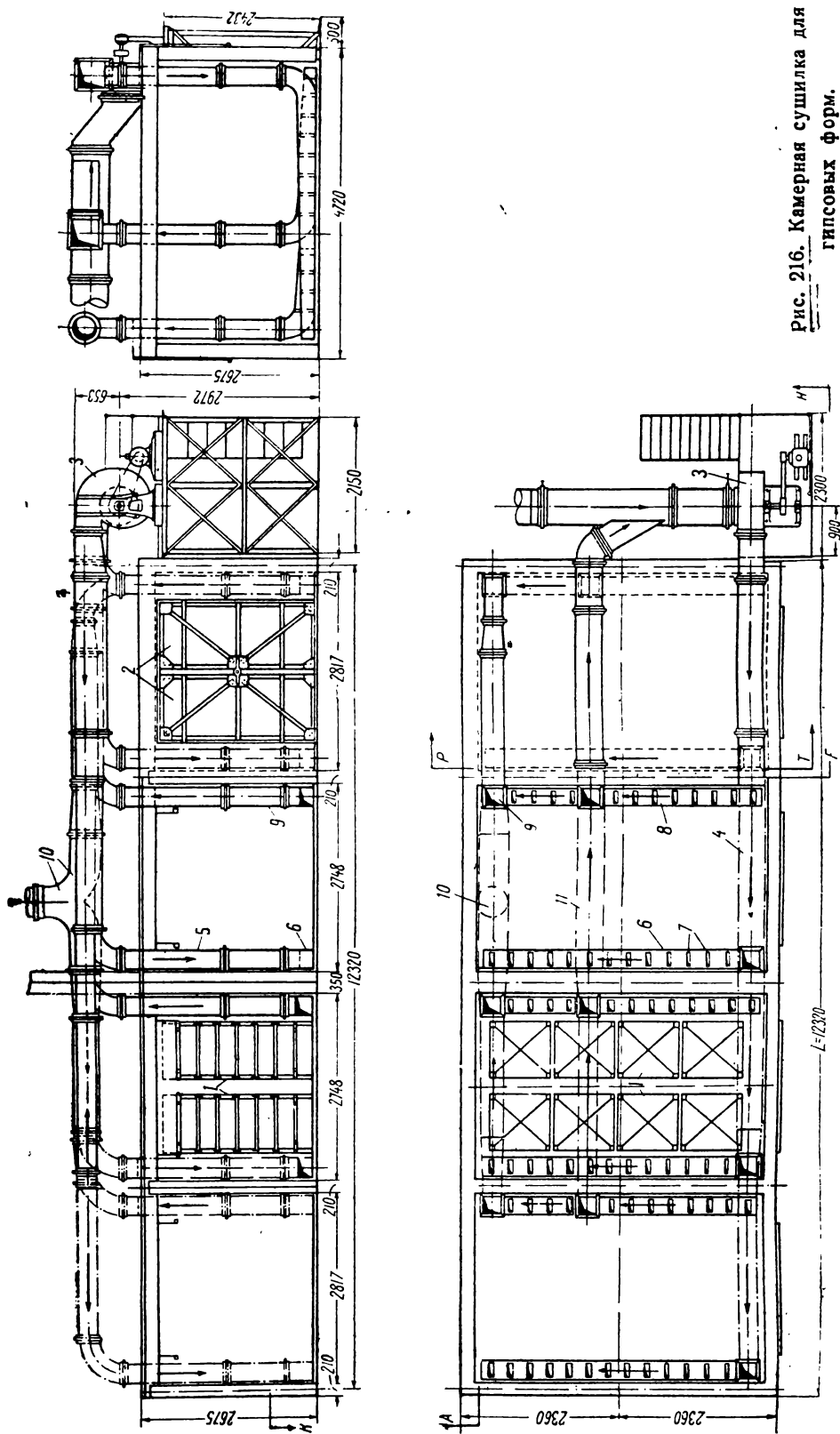


Рис. 216. Камерная сушилка для гипсовых форм.

воздуха должна регулироваться в пределах не свыше 70 °С путем разбавления его воздухом, подсосанным из атмосферы.

Открывая, по мере потребности, шибер, отделяющий воздухопровода влажного воздуха от всасывающей трубы вентилятора, можно установить работу сушилок по принципу многократного насыщения с регулированием кратности рециркуляции.

Все воздухопроводы выполнены из железа и снабжены шиберами для регулирования работы отдельных камер.

Сушилка по конструкции весьма гибка в управлении и потому ее можно использовать и для сушки других изделий, например шамотных капсулей.

В основу теплового расчета сушилки положены следующие данные.

Влажность гипсовых форм, поступающих в сушку:

относительная . . . . . 35%  
абсолютная . . . . . 54%

Влажность после сушки:

относительная . . . . . 10%  
абсолютная . . . . . 11,1%

Загрузка каждой камеры по сухому весу форм . . . 100 кг

Средняя продолжительность сушки . . . . . 16 час.

## 1. Тепловой расчет сушилки (расчет произведен с помощью линейки, результаты вычислений приближенные)

1. Расчет теплотерь для отдельных элементов ограждения сушильных камер производится по обычным формулам теплопередачи через многослойную перегородку.

Поверхности охлаждения камеры:

- 1) боковая наружная стена . . . . . 12,8 м<sup>2</sup>
- 2) боковая внутренняя стена . . . . . 12,8 "
- 3) потолок и пол . . . . . 14,3 "
- 4) торцевые стены . . . . . 9,7 "
- 5) двери . . . . . 4,7 "

Коэффициенты теплопередачи  $k$  при данной конструкции сушилки получили следующие выражения:

- 1) наружные стены . . . . .  $k = 0,57$
- 2) внутренние стены . . . . .  $k = 0,70$
- 3) потолки . . . . .  $k = 0,41$
- 4) пол . . . . .  $k = 1,0$
- 5) двери . . . . .  $k = 1,03$

Таким образом, суммарная потеря тепла в окружающую атмосферу:

$$Q_1 = [(12,8 + 9,7) \times 0,57 + 14,3 \times 0,41 + 14,3 \times 1 + 4,7 \times 1,03] \times (90 - 15) + 12,8 \times 0,70 \times (60 - 20) = 2000 \text{ кал/час,}$$

где (90 — 15) и (60 — 20) есть разность температур воздуха с двух сторон ограждения сушилки.

2. Расход тепла на нагрев гипсовых форм:

$$Q_2 = \frac{1000 \times (0,23 + 0,111) \times (65 - 13)}{16} = 1100 \text{ кал/час,}$$

где: 1000 — вес сухой массы форм в кг,  
0,23 — средняя теплоемкость гипса,  
0,111 — количество влаги в кг, остающееся в 1 кг гипса,  
65 — конечная температура гипсовых форм в °С,  
13 — начальная температура гипсовых форм в °С,  
16 — продолжительность сушки в часах.

3. Расход тепла на нагрев деревянных клетей:

$$Q_3 = \frac{8 \times 125 \times 0,65 (65 - 13)}{16} = 2100 \text{ кал/час},$$

где: 8 — количество клетей,  
125 — вес клетки (деревянной),  
0,65 — теплоемкость дерева,  
65 — температура клетки в конце сушки в °С,  
13 — температура клетки до поступления ее в сушилку в °С,  
16 — продолжительность пребывания клетей в сушилке.

Суммарный среднечасовой расход тепла с надбавкой 35% на неучтенные потери:

$$Q = 1,35 (2000 + 1100 + 2100) = 7000 \text{ кал/час}.$$

Среднечасовое количество испаряемой влаги:

$$W_1 = \frac{1000 (0,43 - 0,111)}{16} = 20 \text{ кг/час}.$$

Теплопотери, отнесенные к 1 кг испаренной влаги:

$$q = \frac{7000}{20} = 350 \text{ кал/кг}.$$

Параметры горнового воздуха, являющегося источником тепла для проведения процесса сушки гипсовых форм:

Температура  $t_0 = 80^\circ$ ; влажность  $\varphi_0 = 2\%$ ; влагосодержание  $d_0 = 8 \text{ г/кг}$ ;  
теплосодержание  $i = 24,3 \text{ кал/кг}$ .

Параметры воздуха, поступающего в штабель в период максимальной температуры сушки:

$$t = 70^\circ; \varphi = 7\%; d_1 = 10,3 \text{ г/кг}; i = 23,4 \text{ кал/кг}.$$

Параметры отработавшего в сушилке воздуха:

$$t_2 = 45^\circ; \varphi_2 = 28\%; d_2 = 16,5 \text{ г/кг}; i_2 = 21,1 \text{ кал/кг}.$$

При заданных параметрах, количество воздуха, циркулирующего в камере:

$$L_{\text{ц}} = \frac{20 \cdot 1000}{16,5 - 10,3} = 3250 \text{ кг/час}.$$

Среднечасовой расход горнового воздуха в период максимальной температуры сушки будет:

$$L_{\text{г}} = \frac{20 \cdot 1000}{16,5 - 8} = 2360 \text{ кг/час}.$$

Из всего количества циркулирующего в камере воздуха отработавшая часть его равная количеству поступающего из горна воздуха — 2360 кг/час, выбрасывается наружу. Остальная часть в количестве]

$$3250 - 2360 = 890 \text{ кг/час}.$$

рециркулирует, поступая по возвратной трубе через вентилятор в систему разводящих воздуховодов.

Для осуществления циркуляции в четырех рядом стоящих камерах намечен к установке центробежный вентилятор „Сирокко“ низкого давления № 5, тип „Е“, левого вращения.

## II. Гидравлический расчет сушилки

Общее количество воздуха, циркулирующего в зоне в период максимальной температуры сушки воздуха по приведенному выше расчету —

$$3250 \text{ кг/час} = 3250 \text{ м}^3/\text{час}^1 \text{ или } \frac{3250}{3600} = 0,9 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

<sup>1</sup>  $\gamma = 1,008$ ; для упрощения расчета принимаем  $\gamma = 1$ .

Определим местные сопротивления движению воздуха.

1. Потеря напора на поворот из бокового канала в штабель. Скорости в боковом канале:

$$V = \frac{0,9}{4,3 \times 0,45} = 0,45 \text{ м/сек};$$

$$\xi = 1,15;$$

$$Z = \xi \frac{V^2}{2g} = 1,15 \cdot \frac{0,45^2}{19,62} = 0,012 \text{ мм вод. ст.},$$

где  $\xi$  — коэффициент местного сопротивления;

$g$  — ускорение силы тяжести = 9,81 м/сек.

2. Сопротивление вылета воздуха из щелей подающего канала. Скорость вылета

$$V = 1 \text{ м/сек},$$

что составляет:

$$\xi = 1; \quad Z = \frac{1^2}{19,62} = 0,05 \text{ мм вод. ст.}$$

3. Сопротивление щелевого подающего канала. Определим среднюю скорость в канале:

$$V_1 = \frac{0,9}{0,3 \times 0,3} = 10 \text{ м/сек};$$

$$V_2 = \frac{0,09}{0,3 \times 0,1} = 3 \text{ м/сек};$$

$$V_{\text{ср}} = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{10 + 3}{2} = 6,5 \text{ м/сек};$$

$\xi = 2$  (с учетом сопротивления трения);

$$Z = 2 \cdot \frac{6,5^2}{19,62} = 4,31 \text{ мм вод. ст.}$$

4. Потеря напора на поворот из вертикального канала в горизонтальный щелевой, устанавливаемый на повороте лопатки:

$$V = 10 \text{ м/сек}; \quad \xi = 0,35;$$

$$Z = 0,35 \cdot \frac{10^2}{19,62} = 1,75 \text{ мм вод. ст.}$$

5. Сопротивление трения при прохождении воздуха по вертикальному каналу. Скорость в канале:

$$V = 10 \text{ м/сек.}$$

Эквивалентный диаметр:

$$F = 300 \times 300 = 90000; \quad D_{\text{экв}} = 280 \text{ мм}; \quad q = 0,9 \text{ м}^3/\text{сек}; \quad R = 0,5; \quad L = 2,7 \text{ м.час.}$$

$$RL = 0,5 \times 2,7 = 1,35 \text{ мм вод. ст.}$$

6. Потери на повороте горизонтальной трубы в вертикальную (устанавливаем на повороте лопатки):

$$\xi = 0,35;$$

$$Z = 0,35 \cdot \frac{10^2}{19,62} = 1,75 \text{ мм вод. ст.}$$

$$V = 10 \text{ м/сек.}$$

7. Сопротивление двух тройников на проход в местах присоединения к разводящей магистрали стояков в двух камерах.<sup>1</sup>  
Скорость в ответвлениях

$$V = 10 \text{ м/сек}; \quad \xi = 1;$$

$$Z = 2 \cdot \frac{10^3}{19,62} = 10 \text{ мм вод. ст.}$$

8. Сопротивление трения при прохождении воздуха по разводящей магистрали. Максимальная скорость в разводящей магистрали при одновременной работе трех сушилок:

$$V_{\max} = \frac{3 \times 0,9}{0,5 \times 0,4} = 13,5 \text{ м/сек.}$$

Эквивалентный диаметр:

$$D_{\text{эkv}} = 450 \text{ мм}; \quad q_1 = 2,7 \text{ м}^3/\text{сек}; \quad R = 0,5.$$

Минимальная скорость в канале

$$V_{\min} = \frac{0,9}{0,3 \times 0,3} = 10 \text{ м/сек};$$

$$D_{\text{эkv}} = 280 \text{ мм}; \quad R = 0,5; \quad L = 9 \text{ м/час}; \quad RL = 0,5 \times 9 = 4,5 \text{ мм вод. ст.},$$

где  $R$  — сопротивление 1 м трубы (магистрали),

$L$  — длина разводящей магистрали.

Сумма сопротивлений подающей ветви:

$$\Sigma Z_n = 0,012 + 0,05 + 4,31 + 1,75 + 1,35 + 1,75 + 10 + 4,5 \approx 24 \text{ мм вод. ст.}$$

Сопротивление всасывающей ветви вентилятора

Рециркулирующее количество воздуха 890 кг/час или 890 м/час.

$$\frac{890}{3600} \approx 0,25 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

1. Сопротивление входа в лотку всасывающего канала:

$$V = 0,5 \text{ м/сек}; \quad \xi = 1; \quad Z = 1 \cdot \frac{0,5^3}{19,62} \approx 0,015 \text{ мм вод. ст.}$$

2. Сопротивление всасывающего щелевого канала. Максимальная скорость в канале:

$$V = \frac{0,25}{0,3 \times 0,3} = 2,8 \text{ м/сек}; \quad \xi = 2;$$

$$Z = 2 \cdot \frac{2,8^3}{19,62} = 0,8 \text{ мм вод. ст.}$$

3. Сопротивление поворота в вертикальный воздуховод:

$$\xi = 0,35; \quad V = 2,8 \text{ м/сек}; \quad Z = 0,35 \cdot \frac{2,8^3}{19,62} = 0,14 \text{ мм вод. ст.}$$

4. Сопротивление трения при прохождении воздуха через вертикальный канал.

$$D_{\text{эkv}} = 280 \text{ мм}; \quad q = 0,25 \text{ м}^3/\text{сек}; \quad V = 2,8 \text{ м/сек}; \quad R = 0,05; \quad L = 2,7 \text{ м/час};$$

$$RL = 0,05 \times 2,7 = 0,14 \text{ мм вод. ст.}$$

<sup>1</sup> Принимаем, что из четырех камер, обслуживаемых одним вентилятором, одновременно работают три камеры.

5. Потери на поворот вертикального воздуховода в горизонтальный:

$$\xi = 0,35;$$

$$Z = 0,35 \cdot \frac{2,8^2}{19,62} = 0,14 \text{ мм вод. ст.}$$

6. Сопротивление двух последовательных тройников на проход:

$$\xi = 2,0;$$

$$Z = 2 \cdot \frac{2,8^2}{19,62} = 0,8 \text{ мм вод. ст.}$$

7. Сопротивление трения рециркуляционной магистрали. Максимальная скорость воздуха в магистрали при одновременной работе трех камер и сечении магистрали  $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$ :

$$V = \frac{3 \times 0,25}{0,4 \times 0,4} = 5 \text{ м/сек.}$$

Эквивалентный диаметр:

$$D_{\text{эв}} = 400 \text{ мм}; R = 0,067; L = 9 \text{ м/час}; RL = 0,067 \times 9 = 0,60 \text{ мм вод. ст.}$$

8. Потери на поворот во всасывающее отверстие вентилятора:

$$V = 5 \text{ м/сек}; \xi = 1; Z = \frac{5^2}{19,62} = 1,27 \text{ мм вод. ст.}$$

Суммарное сопротивление всасывающей ветви:

$$\Sigma_{Z_{\text{вс}}} = 0,015 + 0,8 + 0,14 + 0,14 + 0,14 + 0,8 + 0,6 + 1,27 \approx 4 \text{ мм вод. ст.}$$

Статический напор вентилятора:

$$h_{\text{ст}} = 24 + 4 = 28 \text{ мм вод. ст.}$$

Скоростной напор вентилятора:

$$V_{\text{к}} = \frac{3 \times 0,9}{0,4 \times 0,4} = 16,8 \text{ м/сек};$$

$$h_{\text{к}} = \frac{16,8^2}{19,62} = 14,3 \text{ мм вод. ст.}$$

Полный напор вентилятора:

$$h_{\text{в}} = 28 + 14,3 = 43 \text{ мм вод. ст.}$$

Подбор электродвигателя:

$$N = \frac{2,7 \times 43}{75 \times 0,4 \times 0,96} = 4,0 \text{ л. с.}$$

Принят к установке электромотор трехфазного тока открытого типа с короткозамкнутым ротором. Тип мотора АТЗАІ-4. Мощность 3,2 kW. Число оборотов—1440 об./мин.



## ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

### СУШИЛКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

В керамической промышленности широко применяются непрерывно действующие сушилки трех типов:

- а) вращающиеся сушильные барабаны,
- б) туннельные сушилки и
- в) конвейерные сушилки.

В зависимости от свойств изделий или материалов, подлежащих высушиванию, предъявляемых к процессу сушки технических требований, заданного режима и схемы воздушных потоков, — устройство сушилок и способы их обогрева получают весьма разнообразное конструктивное оформление, часто приспособляемое к условиям транспорта в смежных отделениях завода и планировке последнего. Поэтому, не делая попытки описать все практически осуществленные конструктивные варианты, в дальнейшем разбираются в виде примеров лишь несколько наиболее распространенных сушилок по отмеченным трем типам сушильных устройств.

#### 1. Сушильные барабаны

Вращающиеся барабаны применяются на заводах грубой и тонкой керамики, главным образом, для сушки глин и каолинов перед тонким измельчением. Вращающиеся сушильные барабаны (так же, как и вращающиеся печи) могут применяться лишь в тех производствах, где допускается, попутно с сушкой, некоторое измельчение материала, и возможное загрязнение последнего ржавчиной со стенок барабана не мешает производству.

Автоматическое передвижение материала в процессе сушки от входного к выходному отверстию барабана позволяет механизировать смежные процессы, например, дробление глин перед сушкой и последующий тонкий помол, и ставит эти аппараты в разряд вполне современного и совершенного оборудования. Конструкция вращающихся сушилок претерпела значительную эволюцию в сторону увеличения поверхности взаимодействия топочных газов с высушиваемым материалом, повышения загрузки сечения барабана и уменьшения его длины с достаточно полным использованием тепла.

Варианты сушилок от простейшей вращающейся трубы до современного ячеекового барабана показаны на рис. 217.

Горячие газы, омывающие стенки барабана, и отдельные куски

высушиваемого материала, могут в отдельных случаях двигаться как по ходу материала, так и в противоположном направлении.

Противоток горячих газов встречается в сушилываемому материалу может дать сокращение тепловых потерь с отходящими газами. Однако, при сушке глин и каолинов возникает опасность склеивания отдельных кусочков материала от конденсации паров, насыщающих отрабо-

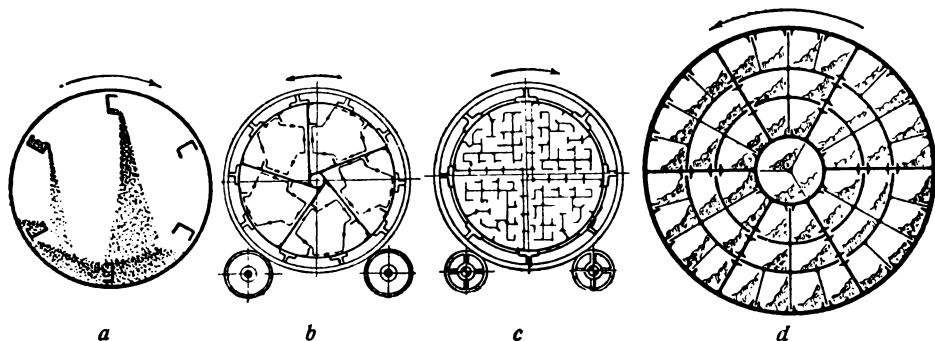


Рис. 217. Типы сушильных барабанов.

танные газы, при соприкосновении последних со свежим холодным материалом. Поэтому для сушки в барабанах всех пластичных материалов, слипающихся и скатывающихся в круглые комки, применяется движение газов по ходу материала. Горячие газы с небольшой влажностью при прямоточном движении омывают куски сырого материала, на которых сразу образуется корочка, препятствующая их слипанию в крупные комки и прилипанию к стенкам сушильного барабана. Однако при подаче в барабан дробленых мерзлых глин (явление, конечно, ненормальное) типа часовой-ярской и латной, даже и прямоточное движение горячих газов, как показали практические наблюдения, не спасает положения: глина скатывается в круглые комки, внутри которых остается сырой и непригодной для измельчения.

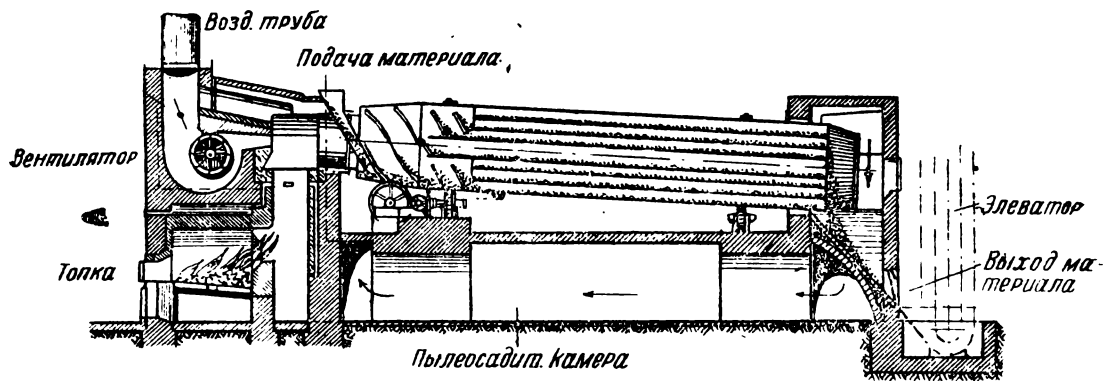


Рис. 218. Сушильный барабан Меллер и Пфейфер.

На рис. 218 показано устройство ячейкового сушильного барабана системы Меллер и Пфейфер, обогреваемого специально оборудованной топкой. Железный клепаный барабан, подразделенный на многочисленные ячейки (см. рис. 217) и обтянутый стальными бандажами, вращается в наклонном положении на четырех катках, из кото-

рых одна пара приводится в движение от конической зубчатой передачи.

В передней части барабан имеет распределительную головку. В последней, с внутренней стороны барабана, укреплены винтовые лопасти, при вращении барабана направляющие материал в отдельные его ячейки. Распределительное устройство имеет целью обеспечить равномерное питание всех ячеек материалом, а следовательно, и горячими газами, которые могут равномерно распределяться по ячейкам, если в них останутся, приблизительно, одинаковые свободные пролеты.

Дробленая глина должна подаваться в барабан регулярно из бункера с механическим питателем или же непосредственно из-под глинодробилки, если последняя регулярно обслуживается и работает без перебоев. Вместе с материалом в барабан подается топочные газы, разбавляемые струей холодного воздуха, вдуваемого с помощью вентилятора. Подача воздуха в барабан, следовательно, и температура газовой смеси регулируются с помощью шибера, отделяющего камеру вентилятора от атмосферы.

При открывании шибера вентилятор начинает работать на выхлоп в атмосферу, и температура топочных газов повышается, и наоборот. Кроме того, в сушилке имеется обходной канал, тоже с регулирующим шибером. Отработанные газы, по выходе из барабана, по нижнему борovu отводятся в дымовую трубу. Высушенный материал по наклонному лотку сыпается в приемник ковшевого элеватора или винтового шнека (как на Первомайском фарфоровом заводе) и транспортируется последним для дальнейшей переработки.

Таблица 71

ХАРАКТЕРИСТИКА СУШИЛЬНЫХ БАРАБАНОВ ТИПА МЕЛЛЕР И ПФЕЙФЕР

№ барабана	Барабан (в мм)		Потребное помеще- ние (в мм)			Расход энергии в л. с.	Вес установки в кг	Часовая произ- водительность в кг		Расход топлива на сушку	
	диаметр	длина	длина	высота	ширина			для глины с началь- ной влажностью в 22% и конечной в 5%	для песка с началь- ной влажностью в 14% и конечной в 3%	генераторного газа в м <sup>3</sup> /час при калорий- ности 1300 ккал/м <sup>3</sup>	угля в кг/час при калорийности в 7000 ккал/кг
0,6	700	4 000	7 000	2 700	1 400	1,5	4 200	400	1 200	53	10
0,5	850	5 000	8 900	2 800	1 700	2	5 200	800	2 300	106	20
0,4	1 000	6 000	9 500	3 000	2 150	2,5	7 000	1 200	3 900	158	28
0,3	1 100	6 500	10 000	3 150	2 250	3	8 500	1 600	5 100	220	40
0,2	1 200	7 000	10 500	3 500	2 700	3,5	10 000	2 100	6 500	280	50
0,1	1 300	7 500	11 500	3 750	3 000	5	11 500	2 700	8 200	350	65
1	1 400	8 000	12 800	4 000	3 100	6,5	14 000	3 400	10 200	430	80
2	1 500	8 500	13 500	4 100	3 200	7,5	17 500	4 100	12 400	520	95
3	1 600	9 000	14 000	4 200	3 500	9	20 000	5 000	14 800	640	115
4	1 700	9 500	14 800	4 400	3 600	10	22 500	6 000	17 500	770	140
4а	1 800	10 000	15 700	4 850	3 900	12	27 000	7 000	20 700	880	160
5	1 900	10 500	16 500	5 150	4 000	13,5	31 000	8 000	24 000	1 000	180
5а	2 000	11 000	17 500	5 300	4 100	15	35 000	9 500	28 000	1 200	220
6	2 100	11 500	17 800	5 550	4 200	17	40 000	11 000	32 600	1 400	250

Сухой материал получается слегка загрязненным золой (ничтожные доли процента), что не имеет практического значения при доброкачественном топливе. Возможно обогреть сушильные барабаны горячим воздухом, получаемым при охлаждении печей, где таковой имеется в достаточном количестве и с желательной температурой. При этом отпадает устройство топки, и конструкция сушилки упрощается. Возможно и комбинированное отопление горячим воздухом и резервной топкой, когда горячего воздуха нехватает или последний имеет невысокую температуру.

Для сохранения пластических свойств высушиваемых глин и каолинов, необходимо следить за работой топки и смешением продуктов горения со свежим воздухом во избежание перегрева. Подогрев глины до  $200^{\circ}\text{C}$  уже сопровождается снижением их пластичности, а при нагреве в пределах  $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$  глины совершенно теряют пластичность.

В таблице 71 (стр. 403) приведена характеристика сушильных барабанов Меллер и Пфейфер для разной производительности (по данным фирмы).

## II. Туннельные сушилки

Туннельные сушилки непрерывного действия имеют перед камерными периодическими сушилками ряд преимуществ в отношении удобств обслуживания, увязки работы сушилок со смежными производственными операциями и, как правило, обладают более высоким коэффициентом теплоиспользования.

Как уже отмечалось, обслуживание туннельных сушилок заключается в регулярной подаче в туннель вагонеток с сырыми изделиями и наблюдении за нормальной работой нагревательных и вентиляционных устройств, тогда как в сушилках периодического действия требуется непрерывное регулирование температур, влажности и скоростей воздуха для получения заданного режима сушки. Изготовление сырых изделий и дальнейшая их обработка после сушки производятся непрерывно. Поэтому работа туннельных сушилок, непрерывно поглощающих и выдающих изделия небольшими партиями, удачно согласуется со смежными операциями, не требует больших запасов полуфабриката и не загромождает ими помещения, что, в конечном счете, ведет к сокращению боя, брака и других потерь.

В смысле использования тепла даже простейшие туннельные сушилки однократного насыщения работают экономично, что обусловлено значительной длиной пути, проходимого воздухом между высушиваемыми изделиями и продолжительным его пребыванием в сушилке.

Туннельные сушилки однократного насыщения получили большое распространение на заводах грубой керамики.

В простейших туннельных сушилках однократного насыщения вагонетки через определенные промежутки времени проталкиваются навстречу потоку горячего воздуха, температура и влажность которого в отдельных частях канала устанавливаются в зависимости от теплопередачи между воздухом и высушиваемыми изделиями и влаготдачи последних в разных стадиях сушки. Режим сушки в таких сушилках не поддается широкому регулированию и может меняться лишь в сторону ускорения или замедления процесса путем увеличения или уменьшения подачи горячего воздуха и скорости прохожде-

ния вагонеток в туннеле. Поэтому они применяются, главным образом, для сушки не крупных изделий простой формы, не требующих точного соблюдения установленного для них режима сушки (стандартный кирпич из тощих масс, не крупные фарфоровые изделия и т. п.).

Как показал опыт работы туннельных противоточных сушилок системы Мещерякова (ленинградские заводы строительного кирпича № 1 и № 2) и сушилки в Кучине, равномерность сушки зависит от высоты канала: чем выше канал, тем большее получается расслоение воздуха на верхние горячие и нижние более холодные слои и тем большее отставание сушки наблюдается в нижних частях вагонеток. При высоте туннеля 1,77 м (Кучино) большого влияния расслоения на равномерность сушки не отмечено. Оптимальная высота туннельных противоточных сушилок находится в пределах 1,5—2 м, в зависимости от скорости газового потока, длины канала и плотности загрузки вагонеток в поперечном сечении.

При движении воздуха навстречу высушиваемым изделиям, получается, в общем, довольно благоприятное для сушки изменение его влажности и температуры. Входящие в туннель вагонетки с сырыми изделиями омываются уже прошедшим через туннель влажным воздухом, имеющим невысокую температуру, что предохраняет изделия от обезвоживания на их поверхности корочки и трещин, неизбежных при нагреве в сухой атмосфере.

По мере продвижения вагонетки к выходному концу туннеля, изделия встречают более горячие и сухие газы, дающие быструю и безопасную сушку после окончания периода усадки. Иногда возникает опасность перенасыщения воздуха или дымовых газов парами воды, которые, при соприкосновении с введенными в туннель холодными изделиями, конденсируют и портят изделия.

При расчете сушилок, а также при установлении газообмена и скорости продвижения вагонеток в туннеле, необходимо определить для намечаемых условий работы сушилки точку росы и не допускать понижения температуры отработанных газов до значений, близких к этой точке. Необходимо также наладить условия сушки с максимально возможным приближением к намеченному для данных изделий оптимальному режиму.

В целях достижения точного режима сушки и широкой его регулировки, туннельные сушилки строятся в разнообразных вариантах, приспособленных для обслуживания разных керамических производств.

Фирма Меллер и Пфейфер в своих противоточных туннельных сушилках для кирпича, обогреваемых топочными газами, применяет распределенный подвод горячих газов по всей длине туннеля (рис. 219) и отвод их через свод, начиная от середины туннеля и до входных дверей. В этих сушилках топочные газы, разбавленные атмосферным воздухом, подаются через канал, который расположен под полом, и отверстия, распределяющие газы по длине туннеля. Открывая в период наладки сушилки в той или иной мере впускные и выпускные отверстия, можно установить в отдельных зонах сушильного канала желательные температуру и влажность воздуха и, таким образом, получить режим сушки, приближающийся к оптимальному. При этом получается, конечно, недостаточное использование тепла газов, направляющихся снизу вверх по кратчайшему пути между близко расположенными входными и выходными (сводными) отверстиями. Однако эта незначительная (в общем балансе) потеря тепла

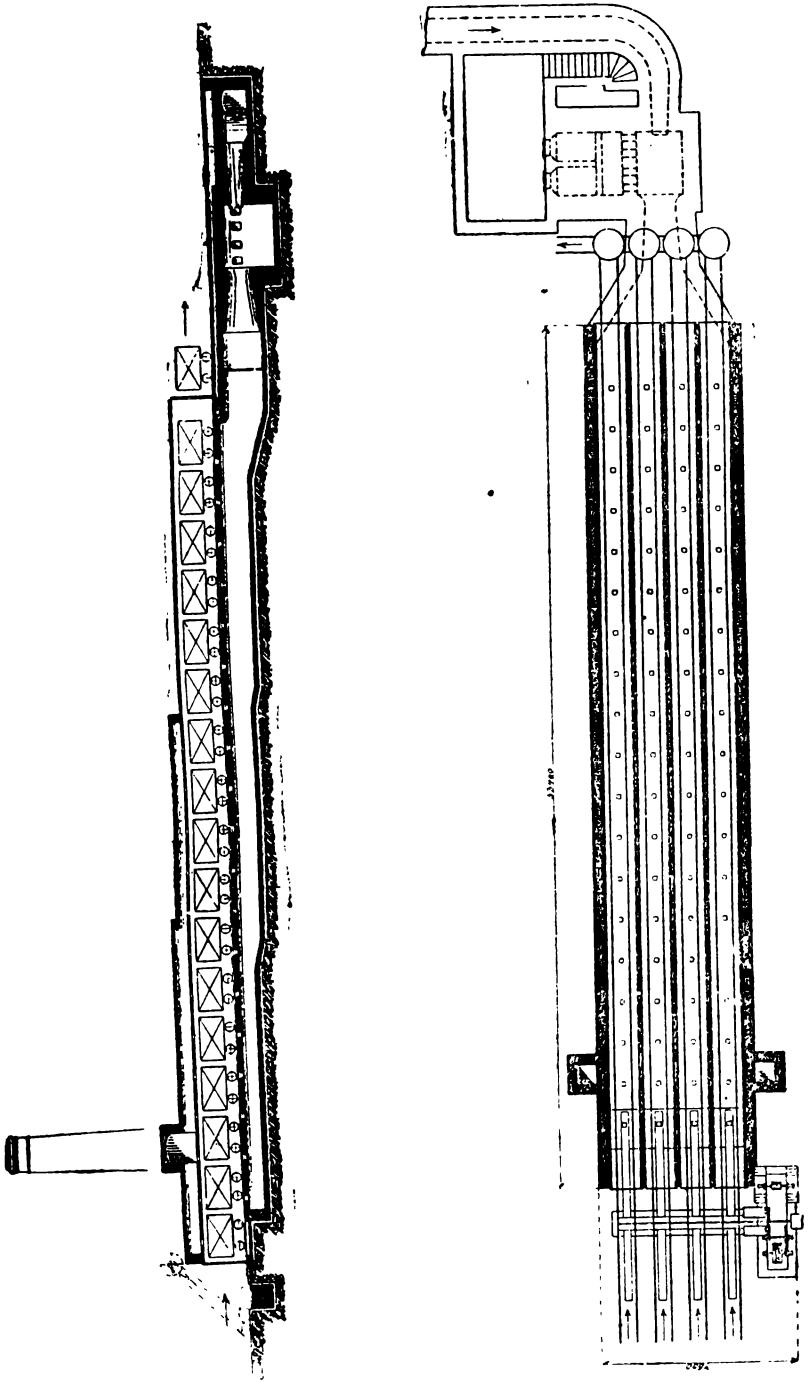


Рис. 219. Прогивочная туннельная сушилка.

с избытком окупается более высоким качеством выпускаемой из сушилки продукции.

Туннельные сушилки однократного насыщения, ввиду простого устройства и обслуживания, а также относительно невысокого удельного расхода тепла, получили широкое распространение во всех производствах, где изделия по своим размерам, форме и свойствам черепка не требуют особо точного выполнения установленного режима сушки. К таким изделиям относятся: строительный кирпич разных видов и сортов, черепица, стандартный шамотный кирпич и мелкий фасон, мелкие фарфоровые, фаянсовые и каменные изделия. Более крупные и сложные по форме изделия, во избежание трещин и деформаций, требуют при ускоренной искусственной сушке точного соблюдения установленных режимов температуры и влажности для отдельных периодов сушки. Для получения равномерного высыхания изделий по толщине, требуются невысокие перепады температуры и влажности воздуха на отдельных участках сушильного туннеля с усиленной циркуляцией, выравнивающей процесс сушки по сечениям туннеля.

Получение больших скоростей воздуха с небольшим перепадом температур и влажностей для смежных вагонеток туннеля возможно лишь при самостоятельной работе тепловых зон туннеля. Высокие скорости циркуляции при однократном насыщении воздуха парами привели бы к большому воздухообмену в отдельных зонах и к значительному снижению коэффициента полезного действия сушилки. Поэтому современные туннели с несколькими зонами сушки работают по принципу многократного насыщения. К установкам этого типа относятся туннельные сушилки фирмы Проктор и Шварц (США), имеющие хорошую репутацию на американских керамических заводах, Кельера и др.

В целях более удобного размещения туннельной сушилки в заводских помещениях и по соображениям конструктивного порядка, в ее канале устраиваются по 3—4 пути для вагонеток и воздуху сообщается зигзагообразное движение.

На рис. 220 показана схема трехпутной сушилки с тремя зонами сушки, имеющими каждая самостоятельную регулировку температуры и влажности. Вагонетки, передвигаясь по туннелю, проходят последовательно эти три зоны с самостоятельными фазами сушки многократного насыщения и довольно мягкими переходами (градациями) температур и влажностей атмосферы от зоны к зоне. На рис. 220 показан вариант сушилки, обогреваемой исключительно паровыми калориферами. По длине туннеля помещается в первой зоне 4 вагонетки, а во второй и третьей — по 2 вагонетки на каждом пути.

Свежий воздух поступает в паровой нагреватель последней зоны и, подогретый до 90—95°С, подается винтовым вентилятором в третью, последнюю зону сушилки, перпендикулярно движению вагонеток. В третьей зоне изделия имеют уже невысокую влажность, и потому воздух, получивший весьма незначительное насыщение, проходит у противоположной стены во второй нагреватель, возвращается вторым вентилятором через ряд вагонеток к первому нагревателю и потом опять через загруженные вагонетки ко второму нагревателю. Таким образом, в третьей зоне получается круговорот и многократное насыщение воздуха парами. По мере подачи в третью зону свежего воздуха, часть отработанного воздуха отделяется от круговой циркуляции и поступает во вторую зону, которая, таким образом, питается уже слегка увлажненным воздухом с температурой

в 70—55°С. Во второй зоне имеются аналогичные подогреватели и вентиляторы, с помощью которых производится круговая циркуляция с многократным дальнейшим насыщением воздуха, поступающего из третьей зоны. Часть воздуха, насыщенного парами

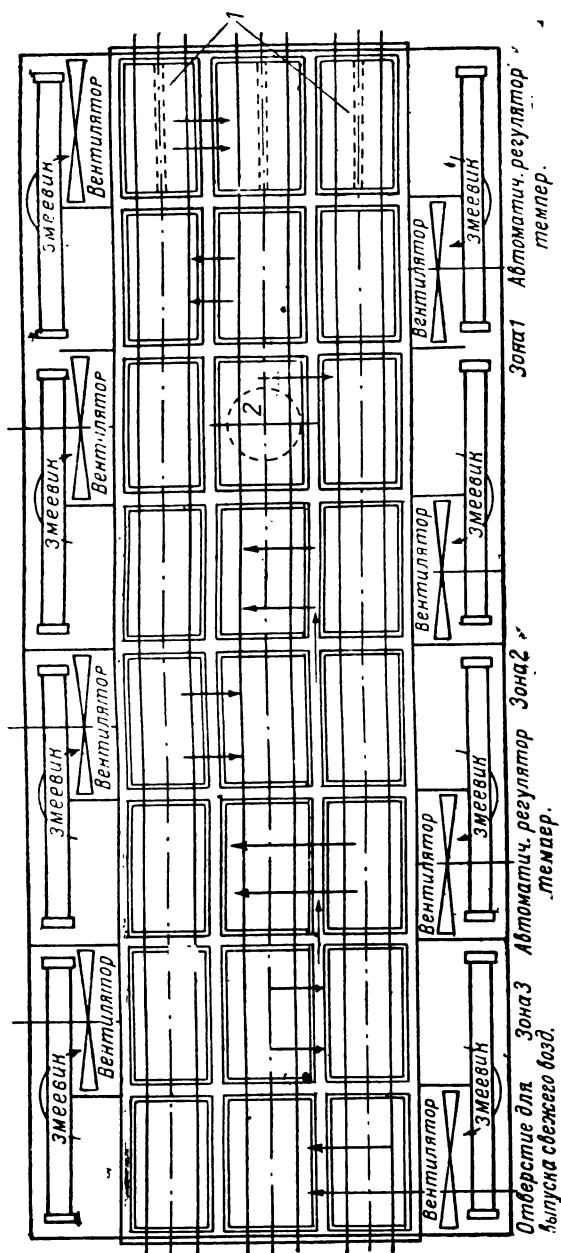


Рис. 220. Туннельная сушилка многократного насыщения (схема).

до пределов безопасной сушки сырых изделий, поступает в первую зону и увлекается ее круговым потоком. Первая зона имеет 4 паровые батареи и 4 вентилятора, с помощью которых регулируется температура влажной атмосферы и производится прогрев изделий и медленная их сушка. Теоретически для зоны «влажной сушки» насыщение парами воздуха, омывающего первые вагонетки, должно приближаться к пределу (100%), чтобы задержать процесс сушки на поверхности до полного прогрева изделий по всей толщине и установления влагонепредачи (трансфузии) влаги из внутренних слоев к поверхности.

Отбор отработанного влажного воздуха производится через трубу, установленную под третьим от входа рядом вагонеток.

Поэтому первый и второй ряды введенных в туннель вагонеток находятся вне путей обмена воздуха (мертвый угол), чем облегчается получение здесь максимально увлажненной горячей атмосферы для про-

грева свежезагруженных изделий. Каждая зона имеет приборы для контроля влажности и температуры, а также для автоматического регулирования последней специальными аппаратами, поддерживающими температуру в каждой зоне на заданном уровне.

На рис. 221 показана четырехколейная туннельная сушилка фирмы Проктор и Шварц, установленная на заводе высоковольтного



фарфора Вестингауз К-о (США). Число отдельных зон сушки и длина их могут при проектировании сушилки меняться, в зависимости от характера заданных кривых сушки и требуемой точности выполнения режима.

В туннельных сушилках многократного насыщения можно использовать для обогрева не только пар, но и горячий воздух, получаемый при охлаждении печей. Третья зона сушки для большинства даже весьма ответственных изделий может, повидимому, обогреваться за счет подачи горячего воздуха. Однако, поскольку температура в зоне в этом случае будет определяться обменом воздуха, то, чтобы избежать подачи излишнего воздуха во вторую и первую зоны, что повлекло бы понижение влажности ниже заданных режимом преде-



Рис. 221. Четырехколейная туннельная сушилка системы Проктор и Шварц.

лов, может потребоваться промежуточный отбор влажного воздуха из третьей зоны сушки. Этот вопрос, равно как возможность питания горячим воздухом второй зоны сушки, должны решаться для каждого вида продукции путем специальных расчетов и опытных исследований.

Первая зона „влажной сушки“ не может обогреваться воздухом от охлаждения печей, так как вносимое воздухом тепло неразрывно связывается в этом случае с интенсивным обменом воздуха и снижением его влажности, что для данной зоны нарушает основное условие ее нормальной работы — разогрев изделий с замедлением процесса сушки. Однако и здесь задача может быть удачно разрешена путем устройства воздушных рекуперативных нагревателей.

Туннельная сушилка многократного насыщения с самостоятельно регулируемы́ми зонами сушки является одним из наиболее совершенных и универсальных устройств в этой области и заслуживает широкого внедрения на заводах, вырабатывающих ответственную и доро-

гую керамическую продукцию. В виде иллюстрации ниже приводятся описание и расчетные данные по туннельной сушилке для огнеупорных шамотных капсулей, применяемых при обжиге фарфора.<sup>1</sup>

Туннельная сушилка (рис. 222) имеет следующие внутренние размеры:

длина . . . . .	28,52 м
ширина . . . . .	4,20 "
высота . . . . .	2,72 "

В канале туннеля проложены четыре колеи 1 для подвесных вагонеток 2.

Туннель разделяется на три зоны, в которых помещаются:

в 1-й зоне . . . . .	4 × 4 = 16 вагонеток
во 2-й " . . . . .	3 × 4 = 12 "
в 3-й " . . . . .	4 × 4 = 16 "

Всего туннель вмещает 44 вагонетки, по 11 в ряд.

Стены сушилки построены из малотеплопроводного кирпича толщиной в 250 мм.

Перекрытие сушилки — деревянное (лучше жел.-бетонная плита), с теплоизолирующей засыпкой, предохраненное от проникновения влаги листовым железом и толем.

Рельсы 1 для подвесных вагонеток поддерживаются подвесками 3, укрепленными на потолке капсульного цеха и проходящими через перекрытие сушилки. Потолок последней не испытывает нагрузки от веса вагонеток.

Проталкивание вагонеток через туннель производится с помощью четырех самостоятельных толкателей 4. Любой ряд вагонеток может продвигаться с любой скоростью, и, таким образом, в одном туннеле можно установить разные режимы сушки для любого ряда вагонеток, в соответствии с ассортиментом загруженных на вагонетки капсулей.

Механизм толкателя (рис. 223) состоит из связанного с червячным редуктором цепного привода 1, с помощью которого передвигается бесконечная цепь 2 с двумя роликовыми упорами 3. Три самостоятельные вентиляционные установки (см. рис. 222) для циркуляции горячей паровоздушной смеси в отдельных зонах сушилки расположены в подвальном помещении, которое, по местным условиям, не может использоваться для иных производственных нужд.

Все три установки оборудованы по одной схеме и состоят из вентилятора „Сирокко“ 5, смесительной камеры 6, трубы 7, подводящей горячий воздух от охлаждающихся фарфоровых горнов труб 8, разводящих кондиционную паровоздушную смесь по длине зоны у боковых стен туннеля, и шиберов, регулирующих работу установок. Влажный отработанный воздух засасывается через горизонтальный, расположенный на полу посередине туннеля канал 9 в смесительную камеру и смешивается здесь с горячим сухим воздухом.

Регулируя подачу горячего сухого и влажного воздуха можно установить необходимую для каждой зоны влажность и температуру паровоздушной смеси.

В тех случаях, когда по роду изделий потребовалось бы предварительно прогреть их во влажной атмосфере, т. е. подавать в смесительную камеру мало свежего горячего воздуха и много отработанного, неизбежно понизилась бы температура смеси с отступлением

<sup>1</sup> По проекту сушилки для капсульного цеха Дулевского завода, выполненному сушильной группой Проектстеклофарфора.

от заданного режима сушки. При незначительном подводе свежего горячего воздуха в смесительную камеру, предусматривается установка парового калорифера для подогрева отработанного влажного воздуха. Калорифер можно установить прямо над смесительной камерой 6 (см. поперечный разрез на рис. 222). Часть отработанного влажного воздуха отводится из каждой зоны сушки в атмосферу с помощью трубы 10, присоединяемой к горизонтальному воздухоотводящему каналу 9.

Тепловой расчет (расчет произведен с помощью линейки, результаты вычислений приближенные)

Продолжительность сушки капсул заданного ассортимента (в основном — тарелочных) рассчитана в среднем на 15 часов:

$$\begin{aligned}
 \text{1-я зона} & \dots \dots \dots \frac{15 \times 4}{11} = 5,45 \text{ час.} \\
 \text{2-я} & \dots \dots \dots \frac{15 \times 3}{11} = 4,1 \text{ } \\
 \text{3-я} & \dots \dots \dots \frac{15 \times 4}{11} = 5,45 \text{ }
 \end{aligned}$$

Вес сухой массы капсул по отдельным зонам составляет:

$$\begin{aligned}
 \text{1-я зона} & \dots \dots \dots 6\,336 \text{ кг} \\
 \text{2-я} & \dots \dots \dots 4\,750 \text{ } \\
 \text{3-я} & \dots \dots \dots 6\,336 \text{ }
 \end{aligned}$$

По отдельным зонам задано следующее снижение влажности капсул:

Зоны	Начальная влажность		Конечная влажность в %	
	относительная	к сухому весу	относительная	к сухому весу
1-я . . . . .	15,5	18,3	12	13,7
2-я . . . . .	12	13,7	7,5	8,1
3-я . . . . .	7,5	8,1	4	4,15

Тепловой расчет сушки производится в обратном порядке, начиная с третьей зоны и руководствуясь заданной конечной влажностью капсул.

*Третья зона*

Продолжительность сушки в третьей зоне 5,45 час.  
 Вес сухой массы капсул, помещающихся в третьей зоне, 6 336 кг.  
 Снижение влажности с 8,1 до 4,15% от веса абсолютно сухих капсул.  
 Принятая для третьей зоны максимальная температура воздуха 80° С. Количество влаги, подлежащее испарению за период сушки:

$$W = 6336 (0,081 - 0,0415) = 251 \text{ кг.}$$

За час в среднем испаряется влаги:

$$W_1 = \frac{251}{5,45} = 46 \text{ кг/час.}$$

1. Потери тепла через боковые стены.  
 Поверхность охлаждения:

$$F_1 = 2 \cdot 10,91 \cdot 3,0 = 65,5 \text{ м}^2.$$



Суммарная потеря тепла на нагревание вспомогательной загрузки третьей зоны сушилки:

$$Q_3 = 150 + 250 = 400 \text{ кал/час.}$$

Среднечасовой расход тепла по всем видам теплопотерь с надбавкой 20% на неучтенные расходы составит:

$$Q = 1,20 (6200 + 4700 + 400) \approx 13\,500 \text{ кал/час.}$$

Теплопотери, отнесенные к 1 кг испаряемой влаги составят:

$$q = \frac{13\,500}{46} = 295 \text{ кал/час.}$$

Сушилка обогревается горячим воздухом, получаемым при охлаждении круглых горнов, состояние которого в качестве теплоносителя и влагопоглотителя характеризуется следующими параметрами:

- 1) температура  $t_0 = 15^\circ \text{C}$ ;
- 2) теплосодержание  $i_0 = 41,35 \text{ кал/кг}$ ;
- 3) влагосодержание  $d_0 = 26,9 \text{ г/кг}$ ;
- 4) коэффициент относительной влажности  $\varphi_0 = 20\%$ .

Параметры воздушной смеси из горячего горнового воздуха и уже отработанного в сушке, подаваемого вентилятором в сушильную камеру третьей зоны, следующие:

$$t_1 = 80^\circ \text{C}; i_1 = 36,15 \text{ кал/кг}; d_1 = 26,9 \text{ г/кг}; \varphi_1 = 8\%.$$

Отработанный в третьей зоне воздух имеет параметры:

$$t_2 = 65^\circ \text{C}; i_2 = 35,05 \text{ кал/кг}; d_2 = 31,2 \text{ г/кг}; \varphi_2 = 19\%.$$

Количество воздуха, циркулирующего в зоне на основе принятых в расчете параметров воздуха, входящего и выходящего из зоны, выразится в следующих объемах:

$$L_{\text{ц}} = \frac{46 \times 1000}{31,2 - 26,9} = 10\,700 \text{ кг/час.}$$

Количество горячего воздуха, подаваемого из горнов в третью зону:

$$L = \frac{46 \times 1000}{31,2 - 8,0} = 1985 \text{ кг/час.}$$

Часть отработанного воздуха в количестве  $10\,700 - 1\,985 = 8\,715 \text{ кг/час}$  возвращается после смешения со свежей порцией горячего воздуха обратно в камеру, а другая часть в количестве  $1985 \text{ кг/час}$ , равная притоку свежего горнового воздуха, направляется во вторую зону сушилки.

Вентилятор третьей зоны рассчитывается на подачу в час намеченных по расчету  $8715 \text{ м}^3$  с некоторым резервом. Принят вентилятор „Сирокко“ низкого давления, тип „Е“, № 5, левого вращения.

### Вторая зона

Продолжительность сушки во второй зоне: 4,1 часа.

Вес сухой массы капсул на 12 вагонетках, помещающихся в зоне: 4750 кг.

Влажность капсул снижается с 13,7 до 8,1% от веса абсолютно сухих капсул.

Максимальная температура воздуха в зоне:  $65^\circ \text{C}$ .

Среднечасовое количество испаряемой влаги:

$$W_2 = \frac{4750 (0,137 - 0,081)}{4,1} = 65 \text{ кг/час.}$$

1. Теплопотери второй зоны через стены, потолок, пол и двери рассчитываются так же, как и в третьей зоне, и выражаются величиной:

$$Q_1 = 3\,000 \text{ кал/час.}$$

2. Среднечасовой расход тепла на нагрев сухой массы капсул и испарившейся влаги от 38 до  $60^\circ \text{C}$

$$Q_2 = \frac{4750 \cdot (0,23 + 0,081) \times (60 - 38)}{4,1} = 8000 \text{ кал/час.}$$

### 3. Расход тепла на нагрев вспомогательной загрузки:

а) Нагрев вагонеток:

$$Q'_3 = \frac{12 \times 275 \times 0,12 \times (65 - 50)}{4,1} = 150 \text{ кал/час.}$$

б) Нагрев деревянных решеток полок:

$$Q''_3 = \frac{12 \times 6 \times 26,5 \times 0,34 (60 - 38)}{4,1} = 350 \text{ кал/час.}$$

$$Q_3 = 150 + 350 = 500 \text{ кал/час.}$$

Суммарный среднечасовой расход тепла с надбавкой 20% на неучтенные потери:

$$Q_5 = (Q_1 + Q_2 + Q_3) \times 1,20 = (3000 + 8000 + 500) \times 1,20 = 13\,800 \text{ кал/час.}$$

Теплопотери на 1 кг испаряемой влаги:

$$q = \frac{13800}{65} = 215 \text{ кал/кг.}$$

Параметры горнового воздуха, поступающего во вторую зону:

$$t_0 = 150^\circ \text{C}; \quad i_0 = 41,35 \text{ кал/кг}; \quad d_0 = 8 \text{ г/кг}; \quad \varphi_0 = 2\%.$$

Параметры воздушной смеси, состоящей из горячего воздуха, поступающего из горнов, и отработанного воздуха, поступающего из третьей зоны:

$$t_1 = 65^\circ \text{C}; \quad i_1 = 35,8 \text{ кал/кг}; \quad d_1 = 32 \text{ г/кг}; \quad \varphi_1 = 19\%.$$

Эта паровоздушная смесь циркулирует через загрузку второй зоны сушилки. Параметры воздуха, отработавшего во второй зоне:

$$t_2 = 48^\circ \text{C}; \quad i_2 = 34,4 \text{ кал/кг}; \quad d_2 = 37,2 \text{ г/кг}; \quad \varphi_2 = 50\%.$$

Общее количество циркулирующего в зоне воздуха:

$$L_{\text{ц}} = \frac{65 \times 1000}{37,2 - 32,0} = 12\,500 \text{ кг/час.}$$

Количество воздуха, подаваемого вентилятором:

$$L_{\text{в}} = 12\,500 - 1985 = 10\,515 \text{ кг/час.}$$

Устанавливается вентилятор № 5 типа F.

Расход тепла во второй зоне на испарение влаги и теплопотери в основном покрываются за счет подачи в сушилку горячего и сухого воздуха из остывающих фарфоровых горнов.

По расчету в час подается горячего горнового воздуха:

$$L = 2240 \text{ кг/час.}$$

Часть рециркулирующего в сушилке воздуха в количестве, равном его часовому поступлению во вторую зону из горнов и третьей зоны, передается в первую зону

$$1985 + 2240 = 4225 \text{ кг/час.}$$

Остальная часть воздуха в количестве:  $12\,500 - 4225 = 8275 \text{ кг/час}$  возвращается в сушильную камеру второй зоны.

#### Первая зона

Продолжительность сушки в первой зоне: 5,45 час.

Вес сухой массы капсул на 16 вагонетках, помещающихся в зоне: 6336 кг.

Влажность капсул снижается с 18,3 до 13,7%.

Максимальная температура воздуха в зоне: 50° С.

Среднечасовое количество влаги, испаряемой в первой зоне:

$$W_3 = \frac{6336 (0,183 - 0,137)}{5,45} = 46,5 \text{ кг/час.}$$

1. Теплопотери первой зоны через стены, потолок, пол и двери по расчету составляют:

$$Q_1 = 3700 \text{ кал/час.}$$

2. Среднечасовой расход тепла на нагрев сухой массы капсулей и неспарившейся влаги от 20 до 38°C

$$Q_2 = \frac{6336 (0,23 + 0,137) \times (38 - 20)}{5,45} = 7650 \text{ кал/час.}$$

3. Расход тепла на нагревание вспомогательной загрузки:

а) На нагревание вагонеток от 15 до 46°C

$$Q_3' = \frac{16 \times 275 \times 0,12 (46 - 15)}{5,45} = 300 \text{ кал/час.}$$

б) На нагрев планок решеток от 15 до 38°C

$$Q_3'' = \frac{16 \times 6 \times 26,5 \times 0,34 (38 - 15)}{5,45} = 600 \text{ кал/час.}$$

Суммарный расход тепла в первой зоне в час с надбавкой 25% на неучтенные потери:

$$Q = 1,25 (3700 + 7650 + 300 + 600) = 15\,300 \text{ кал/час.}$$

Теплопотери, отнесенные к 1 кг испаренной влаги:

$$q = \frac{15\,300}{53,5} = 286 \text{ кал/кг.}$$

Параметры воздуха, подаваемого из горнов:

$$t_0 = 150^\circ \text{C}; \quad i_0 = 41,35 \text{ кал/кг}; \quad d_0 = 8 \text{ г/кг}; \quad \varphi_0 = 20\%.$$

Параметры воздуха, поступающего в штабель:

$$t_1 = 50^\circ \text{C}; \quad i_1 = 34,2 \text{ кал/кг}; \quad d_1 = 36 \text{ г/кг}; \quad \varphi_1 = 42\%.$$

Параметры отработанного воздуха:

$$t_2 = 30^\circ \text{C}; \quad i_2 = 33,3 \text{ кал/кг}; \quad d_2 = 39,1 \text{ г/кг}; \quad \varphi_2 = 83\%.$$

Количество воздуха, циркулирующего в первой зоне:

$$L_{\text{ц}} = \frac{53,5 \times 1000}{39,1 - 36} = 17\,200 \text{ кал/час.}$$

Из второй зоны поступило 4225 кг помимо вентиляционной установки. Через вентилятор проходит в час:

$$17\,200 - 4225 = 12\,975 \text{ кг/час.}$$

Для обеспечения указанной выше циркуляции воздуха установлен в первой зоне вентилятор „Сирокко“ низкого давления, тип „Е“, № 5.

Расход горнового горячего воздуха в первой зоне по расчету составляет 1520 кг/час.

Суммарный среднечасовой расход горячего горнового воздуха в трех зонах сушилки составляет:

$$1985 + 2240 + 1520 = 5745 \text{ кг/час.}$$

Суммарный среднечасовой расход тепла с учетом теплопотерь с отработанным воздухом:

$$5745 \times 41,35 = 237\,500 \text{ кал/час,}$$

где 41,35 — теплосодержание горячего горнового воздуха.

На 1 кг испаренной влаги расход тепла составит:

$$\frac{237\,500}{46 + 65 + 53,5} = 1445 \text{ кал/кг,}$$

где 46, 65 и 53,5 — количества влаги, соответственно отдаваемые капсулями в трех зонах туннельной сушилки.

### III. Конвейерные сушилки

В непрерывно действующих конвейерных сушилках перемещение изделий в сушильной камере производится совершенно автоматически и потому их обслуживание требует минимального расхода рабочей силы. Как видно из схемы устройства конвейерной сушилки

для фарфора (рис. 224), основным ее элементом является камера с полочным конвейером *A*, проходящим в ней извилистый путь и несущим на полках высушиваемые изделия.

Конвейер *A* состоит из двух цепей, на которых через определенные интервалы размещены свободно подвешенные полки. В лучших современных конвейерных сушилках конвейер с формами выводится из сушильной камеры к формовочным станкам *B*. Заформованные на гипсовых формах изделия загружаются на полки конвейера, проходят через сушильную камеру к рабочим местам *B* для их оправки. Конвейер с пустыми формами возвращается через сушильную камеру к формовочным станкам обычно по низу камеры. В крупных конвейерных сушилках для разгрузки конвейера от высушенных изделий устраивается специальное окно, противоположное загрузочному, и формы или полки конвейера возвращаются к последнему пустыми для дальнейшей заформовки. В небольших сушилках, а также при размещении сушилок для обслуживания лишь одной стороны, разгрузку конвейера от высушенных изделий производят через то же окно, что и загрузку.

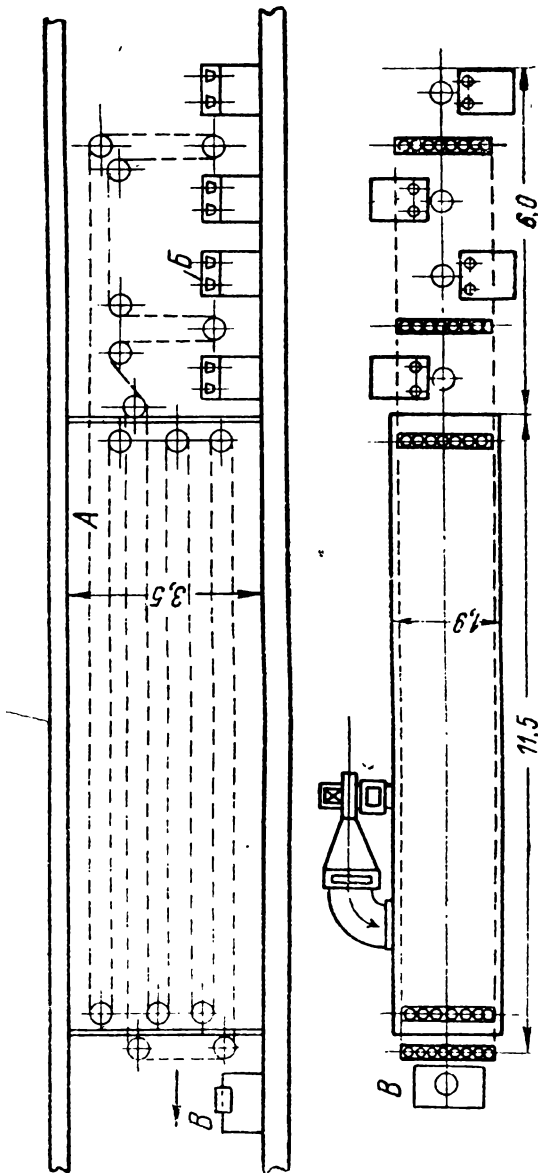


Рис. 224. Конвейерная сушилка для фарфора и фаянса (схема).

В некоторых случаях это может стеснять рабочих, занимающихся формовкой и отсоединением планок с готовыми изделиями.

Имеется и ряд других схем движения конвейера в сушильной камере, например схемы, показанные на рис. 225.

Наибольшее распространение конвейерные сушилки получили



в фарфоровом и фаянсовом производствах на зарубежных заводах. В текущем году на заводах СССР начата установка мощных конвейерных сушилок разных конструкций. В конвейерных сушилках, как и в туннельных, возможны разные способы обогрева: горячим воздухом, паровыми радиаторами, дымовыми газами и комбинированное использование разных типов обогревательных устройств. Наибольшее распространение получили конвейерные сушилки с использованием горячего воздуха, получаемого при охлаждении изделий после обжига. Горячий воздух обычно циркулирует в сушилке по принципу противотока с некоторыми отступлениями, обусловленными зигзагообразной траекторией движения высушиваемого полуфабриката.

Большинство построенных конвейерных сушил работает с однократным насыщением воздуха и большими скоростями циркуляции. Однако в последнее время имеются тенденции к постройке длинных

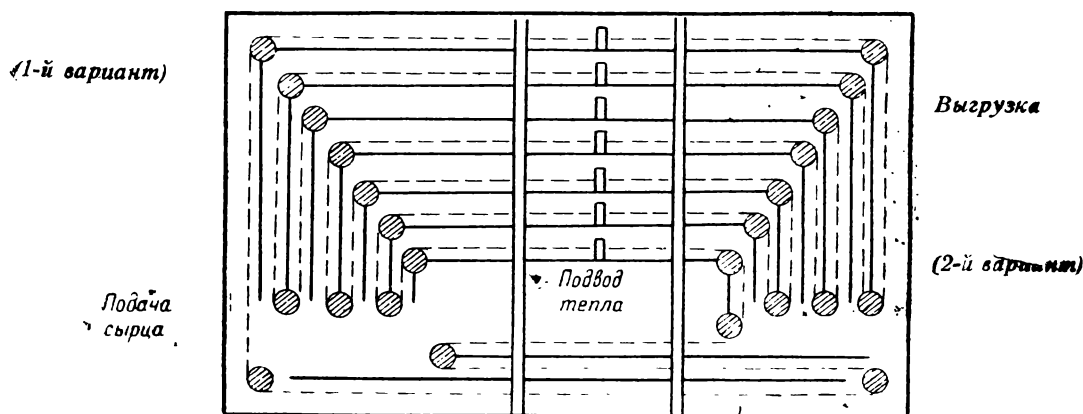


Рис. 225. Схема конвейерной сушилки (тип Дорста).

конвейерных сушилок, в которых, как и в туннельных, имеются широкие возможности использования принципа многократного насыщения с разбивкой сушилки на отдельные зоны с жестко управляемым режимом сушки в каждой из них. В таких сушилках производится удовлетворительная сушка разнообразных, довольно крупных и сложных по форме изделий. Однако для сушки крупных и ответственных изделий конвейерные сушилки не используются, повидимому, по причине более дорогой первоначальной их стоимости и высоких эксплуатационных расходов на тонну высушиваемой продукции, по сравнению с непрерывно действующими туннельными сушилками. По мере накопления эксплуатационных и калькуляционных данных, можно ожидать более точного разграничения сферы использования туннельных и конвейерных сушилок в отдельных отраслях грубой и тонкой керамики. Простота обслуживания и быстрая сушка не крупных изделий обеспечили широкое распространение конвейерных сушилок на фарфоровых и фаянсовых заводах США и Европы, где их постройкой занимаются крупные фирмы.

На рис. 226 показана со стороны загрузочного окна конвейерная сушилка для фарфоровых изоляторов средних размеров.

Рядом с сушилкой установлен горячий пресс для формовки изоляторов, и таким образом, расход рабочей силы на подноску форм сведен к нулю. На рис. 227 подобного типа сушилка показана со

стороны окна для выгрузки из сушилки готовых изоляторов. Рядом помещается станок для оправки изоляторов, которые отправляются в вечной цех для глазуровки и обжига.

Сушка фарфоровой и фаянсовой посуды до введения искусственных сушилок производилась, а на многих заводах и до сих пор производится, на стеллажах, обычно, в течение суток, что требовало значительных площадей для размещения стеллажей и штата подсобных рабочих для переноски планок с изделиями и формами и укладки их на просушку.

Введение конвейерных сушилок позволяет ускорить сушку посуды в 4—6 раз против естественной и свести до минимума расход вспомогательной рабочей силы. Поэтому на крупных новых и модерни-

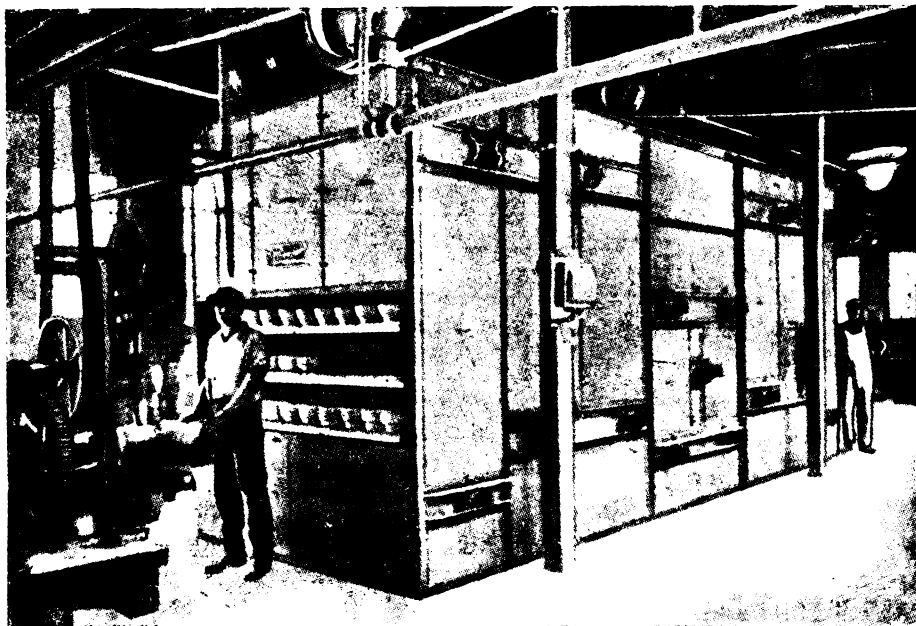


Рис. 226. Конвейерная сушилка для изоляторов; рядом — горячий пресс для их формовки.

зированных заводах с трудоемким процессом производства, устройство искусственных конвейерных сушилок окупается в короткий срок.

На рис. 228 показан цех американского завода, оборудованного искусственными конвейерными сушилками для посуды.

Фотография дает некоторое представление о той высокой организации труда на смежных участках производства, которая обусловлена введением на этом предприятии конвейерных сушилок, работающих непрерывно, с установленной производительностью.

Конвейерные сушилки на заводах СССР еще не получили должествующего распространения, а за границей всесторонние теплотехнические исследования их не производятся или, если производятся, то результаты их не публикуются в печати. Поэтому нет возможности дать исчерпывающие характеристики этого типа сушилок.

В виде иллюстрации приведем описание и выдержки из расчета конвейерной сушилки для фарфоровой посуды.<sup>1</sup>

Сушилка имеет в длину 14,73 м; в ширину 2,7 м; в высоту 4,7 м.

В конце сушилки, где находится выгрузочное окно, высота камеры уменьшена до 3,2 м, с устройством площадки для установки вентилятора и мотора. Внутри сушильной камеры (рис. 229) проходит по зигзагообразному пути цепной конвейер 1, на каждой шарнирной подвеске 2 которого укреплено по две полки. Всего на конвейере 372 полки.

Полки имеют в длину 2,1 м, в ширину 0,33 м и вмещают в ряд по 6 шт. гипсовых форм с заформованными глубокими тарелками. При меньших размерах изделий количество форм, укладываемых на одной полке, соответственно увеличивается.



Рис. 227. Разгрузочное окно конвейерной сушилки; рядом — оправка изоляторов.

Сушилка в торцовых стенах имеет два окна; через одно из них на полки укладываются гипсовые формы после заформовки на них тарелок, а через противоположное — просушенные изделия снимаются с форм.

Полочный конвейер загрузочного окна идет кверху и попутно загружается заформованными изделиями, подымается к первой паре цепных колес и, обогнув последние, спускается к нижней паре направляющих колес. Дальше полки вновь подымаются к верхним ведущим колесам и, обогнув их, опять опускаются вниз и так далее до разгрузочного окна сушилки. Здесь конвейерная цепь опускается в последний раз и направляется горизонтально вдоль пола сушилки к загрузочному окну. При отмеченных выше размерах полки и длине сушилки, конвейер проходит сушильную камеру сверху вниз и обратно

<sup>1</sup> Проект сушилки составлен сушильной группой Проекта стеклофарфора для реконструкции формовочного цеха Дулевского завода.

22 раза, для чего потребовалось 23 пары цепных колес. Цепной конвейер, изолирующее ограждение сушильной камеры и вентиляционные устройства смонтированы на солидном каркасе из швеллерного и углового железа.

Привод конвейера сушилки (рис. 230) осуществляется с помощью электромотора 1, редуктора 2, продольного вала 3 и червячных передач 4, установленных на осях цепных колес.

Всего установлено четыре червячных передачи, что позволяет распределить значительное общее тяговое усилие конвейера на четыре участка и, таким образом, снизить напряжение в цепи конвейера, валах, цепных колесах и облегчить всю конструкцию. Ввиду необходимости резкого снижения количества оборотов и низкой ско-

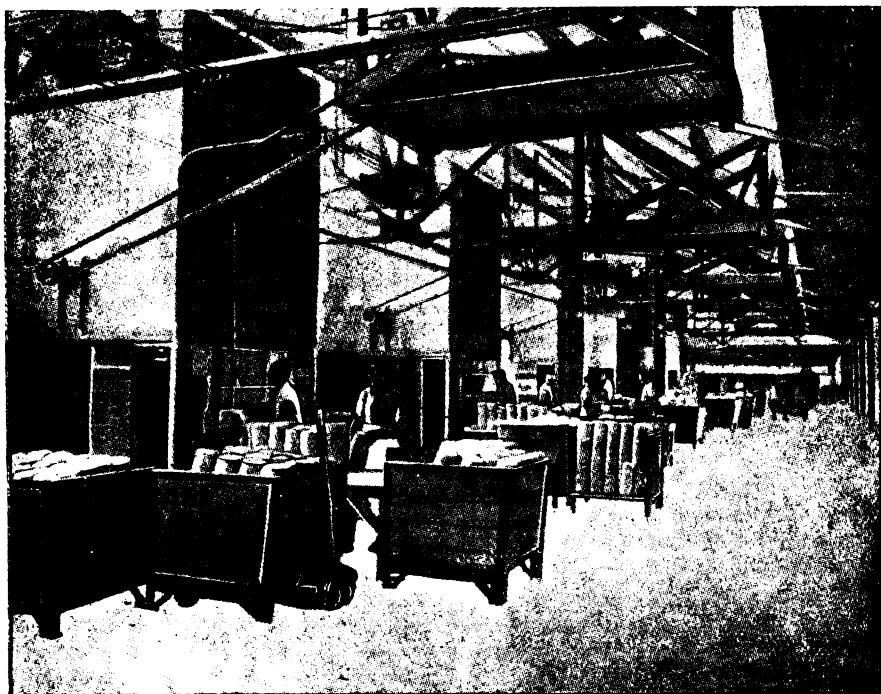


Рис. 228. Цех, оборудованный конвейерными сушилками.

рости конвейера сушилки (около  $7,41 \text{ м/сек}$ ), устанавливается мотор мощностью в  $1,85 \text{ kW}$  и с числом оборотов 750 в мин.

Натяжение цепи конвейера осуществляется собственным весом четырех нижних пар звездочек 3 (см. рис. 229), оси которых вместе с подшипниками 4 могут перемещаться в вертикальных направляющих.

Сушка производится в данном случае с помощью горячего воздуха, получаемого при охлаждении туннельных или периодических (круглых) горнов. Для циркуляции воздуха на каркас сушилki над выгрузочным окном установлен вентилятор „Сирокко“ №  $6\frac{1}{2}$ , с помощью которого горячий воздух подается навстречу движению конвейера к загрузочному окну (рис. 231).

Вентилятор 1 приводится в движение от мотора 2 мощностью в  $4,5 \text{ kW}$  через тексронную передачу 3. Сушилка работает по прин-

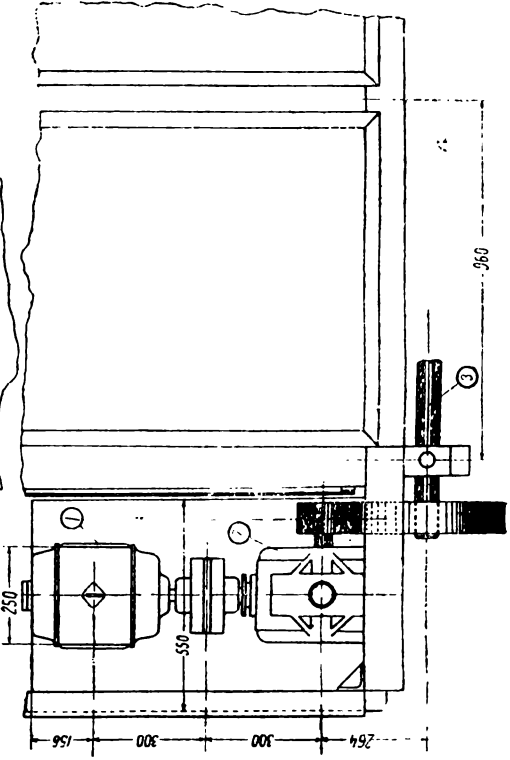
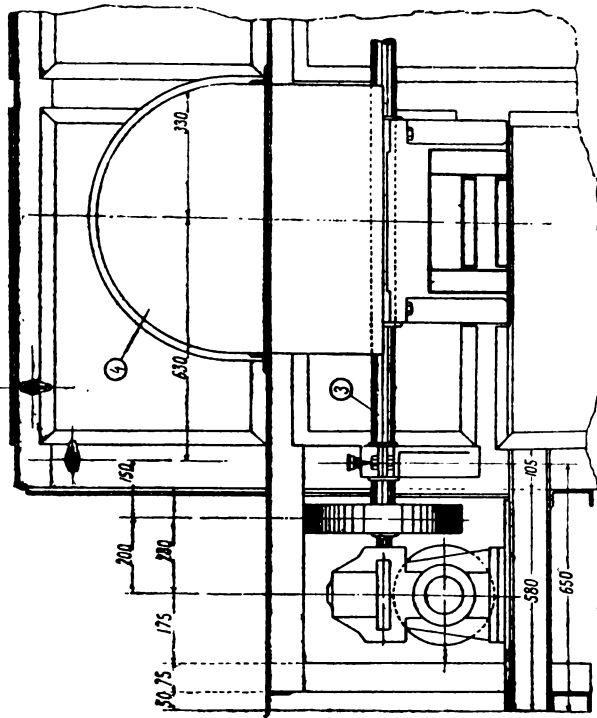
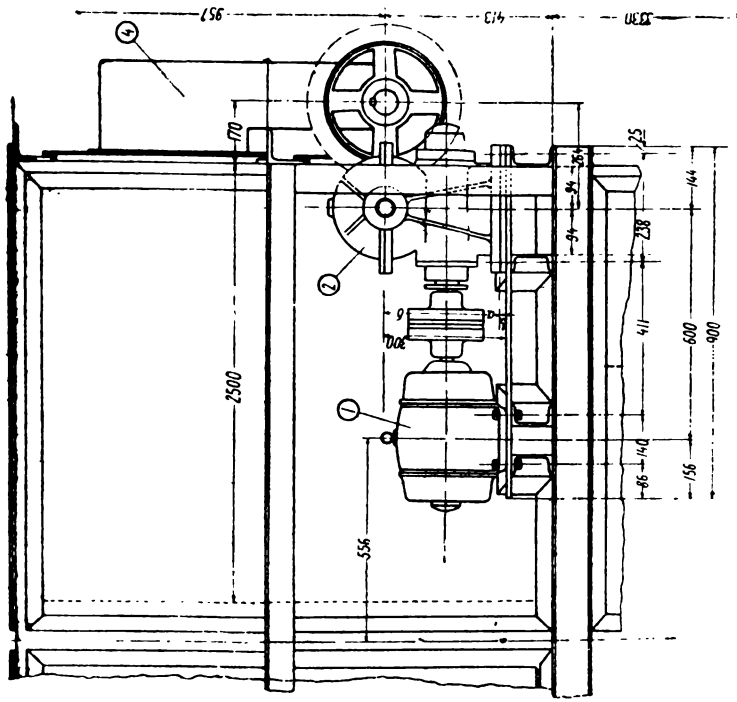


Рис. 230. Привод конвейерной сушилки.

ципу многократного насыщения. Горячий воздух, засасываемый вентилятором 1 из ответвления 4 магистрального трубопровода, разводящего горячий воздух от охлаждающихся печей к сушилкам, подается через диффузор 5 в сушильную камеру. Температура воздуха, подаваемого в сушилку, регулируется путем подсосывания свежего воздуха из атмосферы; изменяя количество последнего, можно держать температуру сушилки в заданных пределах — около 70° С. Горячий воздух от вентилятора подается в сушилку непосредственно через диффузор 5 навстречу движению полок с тарелками и с помощью двух боковых обводных каналов и четырех разветвлений 7 в нижнюю часть сушилки. По расчету, через диффузор должно подаваться 50% всего воздуха и столько же через боковые трубы в нижнюю часть сушилки. Подачу воздуха в боковой отвод можно регулировать поворотным шибером.

Горячий воздух омывает гипсовые формы с подсыхающими тарелками, расположенные на решетчатых полках конвейера, и, по мере насыщения влагой, проходит в переднюю часть сушилки по направлению к загрузочному окну. Здесь отработавший воздух разделяется на два потока, один из которых через два рукава 8 и выхлопную трубу 9 направляется в атмосферу. В выхлопной трубе установлен винтовой вентилятор. Вытяжные трубы для отбора отработанного воздуха расположены около загрузочного окна сушилки между вторым и третьим вертикальными рядами полок.

Второй поток отработанного влажного воздуха направляется через два рукава 10 и трубу 11 обратно к вентилятору. Влажный отработанный воздух примешивается к горячему воздуху, получаемому от охлаждающихся печей.

В рукавах 10 установлены поворотные шибера для регулировки количества влажного воздуха, подаваемого обратно к вентилятору, и влажности воздуха, поступающего в сушилку. При полном закрытии шибера в рукава 10 рециркуляционного трубопровода 11 весь отработанный воздух удаляется через выхлопную трубу 9 в атмосферу, и сушилка работает по принципу противотока с однократным насыщением. При этом в сушилке будет циркулировать воздух с меньшей влажностью, сократится продолжительность сушки, но зато увеличится расход тепла, так как из сушилки будет удаляться воздух с более высокой температурой и меньшим насыщением влагой. Наоборот, увеличивая количество возвращенного к вентилятору отработанного воздуха, получим в сушилке более влажную атмосферу, замедленную сушку и меньшие потери тепла с отработанным воздухом. Количество возвращаемого в сушилку отработанного воздуха, т. е. кратность рециркуляции, регулируется в период эксплуатации сушилки с учетом всех факторов: скорости и качества сушки, расхода тепла и воздуха, а также электроэнергии для привода вентиляторов.

При значительной длине и высоте камеры в верхней ее части обычно вследствие расслоения циркулирует воздух более горячий, чем внизу. В целях более равномерного обогривания низа и верха сушилки, поперек установлены перегородки, не доходящие до пола сушилки и прижимающие поток воздуха вниз.

Для устранения выдувания воздуха из сушилки и засоса его из помещения через рабочие окна, перед последними между ветвями конвейера установлены заградительные ширмы.

## Расчетные данные конвейерной сушилки

(Расчеты выполнены с помощью линейки, результаты вычислений приближенные)

### А. Элементы задания

Часовая производительность . . . . .	600 шт.
Размеры форм: диаметр . . . . .	295 мм
высота . . . . .	85 "
полки: длина . . . . .	2100 "
ширина . . . . .	330 "
Количество тарелок на полке . . . . .	6 шт.
Число полок на люльке . . . . .	2 "
Расстояние между люльками . . . . .	500 мм
Общая длина цепи . . . . .	93 м
Полезная длина цепи . . . . .	75 "
Продолжительность сушки . . . . .	3 час.
Вес сухой массы тарелки . . . . .	0,63 кг
Влажность тарелки (относительная) до сушки . . . . .	23%
после сушки . . . . .	4%
Вес сухой гипсовой фермы . . . . .	2,7 кг
Скорость конвейера сушилки . . . . .	7,416 мм/сек

### Б. Тепловой расчет сушилки

Относительная влажность тарелок, поступающих в сушилку —  $W_1 = 23\%$ .

$$\text{Абсолютная влажность } W_1^a = \frac{23 \times 100}{100 - 23} = 29,8\%.$$

Относительная влажность тарелок после сушки —  $W_2 = 4\%$ .

$$\text{Абсолютная влажность } W_2^a = \frac{4 \times 100}{100 - 4} = 4,2\%.$$

### Подсчет теплотерь

1. Потери тепла через ограждения сушилки:

Поверхность стен . . . . .	$F_1 = 141 \text{ м}^2$
" потолка . . . . .	$F_2 = 40 \text{ "}$
" пола . . . . .	$F_3 = 40 \text{ "}$

Стены сушилки собраны из панелей, состоящих из нескольких изолирующих материалов (в порядке последовательности, начиная с внутреннего):

а) листового железа толщиной  $\delta = 1 \text{ мм}$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 27$ ;

б) войлока толщиной  $\delta = 5 \text{ мм}$  с  $\lambda = 0,06$ ;

в) фанеры толщиной  $\delta = 6 \text{ "}$  с  $\lambda = 0,14$ ;

г) воздушного прослойка  $\delta = 40 \text{ мм}$  с  $\lambda = 0,4$ ;

д) второго слоя фанеры толщиной  $\delta = 6 \text{ мм}$  с  $\lambda = 0,14$ .

Коэффициент теплопередачи изолирующих панелей определяется по формуле:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{12} + \frac{1}{9,3} + \frac{0,001}{27} + \frac{0,005}{0,06} + \frac{0,006}{0,14} + \frac{0,040}{0,04} + \frac{0,006}{0,14}} = 0,735.$$

где:  $\alpha_1$  = коэффициент передачи тепла от воздуха к изолирующим панелям внутри сушилки — принят равным 12,0,

$\alpha_2$  = коэффициент передачи тепла от панелей наружному воздуху — принят равным 9,3.

Коэффициент теплопередачи стен в местах стыка панелей, определенный по той же формуле, равняется:

$$K_2 = 2,8.$$

Площадь стыков составляет 10% всей площади стен.  
Общий коэффициент теплопередачи стен будет:

$$K_c = 0,10 \times 2,8 + 0,90 \times 0,735 = 0,95.$$

Коэффициенты теплопередачи потолка и пола соответственно устанавливаются:

$$K_{\text{пт}} = 1,05.$$

$$K_{\text{па}} = 1.$$

Потеря тепла сушилкой через стены, потолок и пол:

$$Q_1 = F_1 \times K_c + F_2 \times K_{\text{пт}} + F_3 \times K_{\text{па}} = \\ = (141 \times 0,95 + 40 \times 1,05 + 40 \times 1) \cdot (50 - 15) = 7550 \text{ кал/час}$$

где: 50 — средняя температура в сушилке в °C,  
15 — " " вне сушилки в °C.

2. Потери тепла на нагрев сухой массы тарелок и остающейся в них влаги.

$$Q_2 = 600 \times 0,63 \times (0,22 + 0,042) \times (63 - 13) = 4950 \text{ кал/час},$$

где: 600 — часовая производительность в шт.,  
0,63 — вес сухой массы тарелки в кг,  
0,22 — теплоемкость фарфоровой массы,  
0,042 — количество влаги в кг, остающейся в одном 1 кг фарфоровой массы,  
63 — температура нагрева высушиваемых изделий в °C,  
13 — " " изделий, загружаемых в сушилку, в °C.

3. Расход тепла на нагревание вспомогательной загрузки сушилки:

а) Нагрев гипсовых форм:

$$Q_3 = 600 \times 2,7 \times (0,20 + 0,10) \times (63 - 15) = 23200 \text{ кал/час},$$

где: 2,7 — вес сухой массы гипсовой формы в кг,  
0,20 — теплоемкость гипса,  
0,10 — среднее влагосодержание формы в %,  
63 — температура нагрева форм в °C,  
15 — " " форм, загружаемых в сушилку, в °C.

б) Аналогичным способом рассчитываются теплопотери на нагревание деревянных и металлических частей конвейера, составляющие:

$$\begin{aligned} \text{для деревянных частей: } Q_4 &= 23500 \text{ кал/час}, \\ \text{металлических частей: } Q_5 &= 12100 \end{aligned}$$

Суммарный расход тепла на покрытие указанных теплопотерь с запасом 20%:

$$Q = 1,20 \times (7550 + 4700 + 23200 + 23500 + 12100) = 85000 \text{ кал/час}.$$

Количество влаги, подлежащей испарению в час:

$$W = 600 \times 0,63 \times (0,298 - 0,042) = 97 \text{ кг/час}.$$

Количество горячего воздуха, потребное для возмещения теплопотерь (85 000 кал/час) и испарения 97 кг/час влаги, определяется, исходя из принятых для данной сушилки расчетных параметров поступающего в сушилку рециркулирующего и отработанного воздуха.

Воздух, подаваемый из зоны охлаждения туннельных печей, имеет по расчету и диаграммам следующие параметры:

температура  $t_0 = 100^\circ \text{C}$ ,  
относительная влажность  $\varphi_0 = 2\%$ ,  
влагосодержание  $d_0 = 8 \text{ г/кг}$ ,  
теплосодержание  $i_0 = 24,70 \text{ кал/кг}$ .

Параметры воздуха, поступающего в камеру сушилки:

$$t_1 = 70^\circ \text{C}; \varphi_1 = 7\%; d_1 = 12,7 \text{ г/кг}; i_1 = 24,70 \text{ кал/кг}.$$

Параметры воздуха, отработавшего в сушилке:

$$t_2 = 30^\circ \text{C}; \varphi_2 = 70\%; d_2 = 19,3 \text{ г/кг}; i_2 = 18,80 \text{ кал/кг}.$$

Влагосодержание воздуха, подаваемого в сушилку — 12,7 г/кг, а уходящего из камеры — 19,3 г/кг.



Для испарения 97 кг влаги в час потребуется подать в сушильную камеру следующее количество воздуха:

$$L_c = \frac{97 \times 1\,000}{19,3 - 12,7} = 14\,700 \text{ кг/час.}$$

На это количество воздуха рассчитывается пропускная способность центробежного вентилятора. Для данной сушилки подходит вентилятор „Сирокко“ низкого давления тип 3, № 6<sup>1/2</sup>.

В состав 14 700 кг воздуха, проходящего через сушильную камеру, входит горячий воздух, поступающий от охлаждающихся печей, и уже отработанный в сушилке воздух, примешиваемый к свежему горячему. Количество свежего воздуха, поступающего в сушилку, равно количеству удаляемого в атмосферу отработанного воздуха.

Горячий воздух из печей поступает с влажностью  $d_0 = 8 \text{ г/кг}$ , а удаляется в атмосферу с влажностью  $d_2 = 19,3 \text{ г/кг}$ .

Расход воздуха из горнов, следовательно, будет следующий:

$$L_2 = \frac{97 \times 1\,000}{19,3 - 8} = 8\,600 \text{ кг/час.}$$

Из общего часового количества воздуха, циркулирующего в сушилке — 8 600 кг подается из печей, а 6 100 кг (14 700 — 8 600) подается отработанного воздуха через рециркуляционную систему сушилки.

Расход тепла в сушилке вместе с теплопотерями равняется теплосодержанию воздуха, подаваемого из печей; теплосодержание  $i_0 = 29,1 \text{ кал/кг}$ ;  $8\,600 \times 29,1 = 250\,000 \text{ кал/час}$ . Расход тепла на 1 кг испаренной влаги равен:

$$\frac{250\,000}{97} = 2\,580 \text{ кал/кг.}$$

### В. Данные гидравлического расчета сушилки

Расчет скоростей воздушных потоков, циркулирующих в сушилке, и возникающих сопротивлений производится общепринятыми в вентиляционной технике приемами. Сопротивление всасывающей и нагнетательной ветвей вентиляционной системы суммируются и получается напор, который должен дать вентилятор для обеспечения заданного воздухообмена в сушильной камере.

Результаты расчета сведены в таблицу 72.

Подающая ветвь разделяется на два разветвления, из которых воздух направляется прямо на полки конвейера и через боковые трубы и решетку снизу в разные пункты сушилки; через последнюю подается 50% всего воздуха, т. е.  $\frac{14\,700}{2} = 7\,350 \text{ кг/час}$ , что, принимая удельный вес равным округленно = 1, составит  $7\,350 \text{ м}^3$ .

Сумма сопротивлений всасывающей ветви 12,10 мм вод. ст.

Статический напор вентилятора:

$$h_{ст} = 0,10 + 0,63 + 0,2 + 0,63 + 1,89 + 0,86 + 6,4 + 8,8 + 0,27 + 12,10 = 32 \text{ мм вод. ст.}$$

За вычетом напора, полученного в диффузоре (5,6), получим:

$$32 - 5,6 = 26,4 \text{ мм вод. ст.}$$

Скоростной напор вентилятора:

$$h_k = \frac{V^2}{2g} = \frac{15^2}{19,62} = 11,5 \text{ мм вод. ст.}$$

Полный напор вентилятора будет:

$$h_v = 26,4 + 11,5 = 37,9 \text{ мм вод. ст., округленно } 40 \text{ мм вод. ст.}$$

Мощность мотора для вентилятора:

$$N = \frac{14\,700 \times 40}{3\,600 \times 75 \times 0,4 \times 0,95} = 5,65 \text{ л. с.,}$$

где 14 700 — часовая производительность вентилятора в кг,

40 — полный напор в мм вод. ст.

0,4 — коэффициент полного действия вентилятора,

0,95 — „ „ „ „ „ передачи.

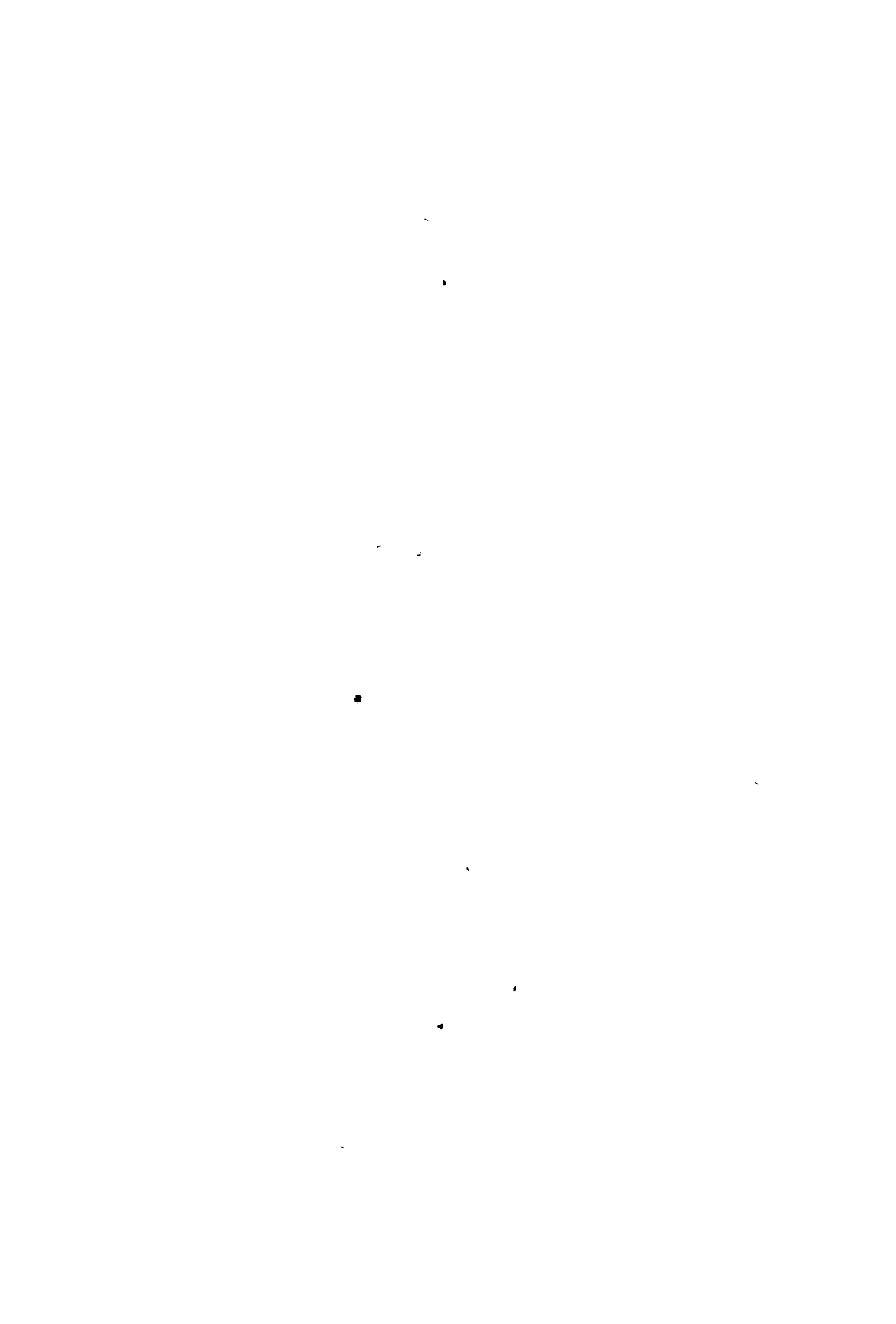
№№ участков подающей ветви	Наименование участка	Секундный объем воздуха в м <sup>3</sup> /сек	Скорость воздуха V в м/сек	Коэффициент местного сопротивления $\epsilon$	Сопроотивление участка по формуле $Z = \epsilon \gamma \frac{V^2}{2g}$ в мм вод. ст.	Примечание
2	Выход воздуха в сушилку через нижнюю решетку . . . . .	0,51	0,95	2	0,10	Удельный вес $\gamma$ для упрощения расчетов принимается равным 1 Секундный обмен воздуха принят неизменным на всех участках, так как незначительные изменения обусловленные изменением температур не имеют существенного значения
3	Поворот из рукава под решетку . . . . .	—	3,5	1	0,63	
4	Горизонтальный и вертикальный участок трубы . . . . .	0,26	3,5	0,081 (налм)	0,20	
5	Поворот горизонтальной трубы в вертикальное ответвление . . . . .	—	3,5	1	0,63	
6	3 тройника трех последовательных участков	—	3,5	1	1,89	
7	Горизонтальный участок трубы . . . . .	1,02	7	0,31 (налм)	0,86	
8	Поворот в разводящий горизонтальный канал	1,02	11,2	1	6,4	
9	Вылет воздуха из диффузора через решетку непосредственно в камеру . . . . .	2,04	9,3	2	8,8	
10	Потери на поворот из диффузора к решетке	2,04	2,3	1	0,27	
	Потери напора в диффузоре . . . . .	4,08	—	—	5,6	
<i>Всасывающая ветвь</i>						
1	Поворот рециркуляционного воздухопровода к всасывающему отверстию вентилятора . . . . .	1,67	10,4	1	5,6	
2	Участок прямого воздухопровода . . . . .	1,67	10,4	0,21 (налм)	1,15	
3	Тройник . . . . .	1,87	5,6	1	1,6	
4	Поворот . . . . .	0,84	5,6	1	1,6	
5	Прямой вертикальный участок трубы . . . . .	0,84	5,2	0,1 (налм)	0,25	
6	Поворот из-под второго пола сушилки во всасывающий трубопровод . . . . .	1,87	5,6	1	1,60	
7	Проход воздуха через решетку второго пола	1,87	1,5	2	0,30	

ХАРАКТЕРИСТИКА КОНВЕЙЕРНЫХ СУШИЛОК ПО ПРЕДЛОЖЕНИЯМ ФИРМ<sup>1</sup>

Назначение сушила	Фирма	Размеры сушила в м			Длительность сушки в мин.	Часовая производительность в шт.	Вес установки без изоляции в кг	Расход энергии л.с.	
		длина	ширина	высота				на привод конвейера	на подачу воздуха
Сушка чашек . . . . .	Дорст	5,0	2,8	2,5	40	600—700	—	—	—
„ тарелок 28 см . . . . .	„	9,0	2,4	3,1	80	600	7 700	0,75	2
„ чашек в формах . . . . .	Вольф	11,5	1,9	3,5	40—60	2 800	6 900	1,5—2	2
„ „ без форм . . . . .	„	7,2	2,3	3,5	—	2 800	3 150	1,5—2	3,5
„ тарелок . . . . .	„	14,0	2,5	3,5	120—150	800	10 000	3,0	7,5
„ чашек . . . . .	Деваг	10,5	1,96	3,75	40—45	2 000	5 600	1,0	2,5
„ тарелок . . . . .	„	12,0	2,2	3,75	120	1 250 <sup>2</sup>	7 000	1,0	2,5
„ блюдец . . . . .	Вольф	3,7	2,6	3,3	—	375	2 300	0,8	2,0

<sup>1</sup> Сушилки указанных фирм закуплены за границей для фарфоровых и фаянсовых заводов.

<sup>2</sup> или 2000 блюдец.



# *ПРИЛОЖЕНИЯ*



ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ ДРОВА ( $W = 30\%$ ,  $Q_H^P = 3026$  кал/кг)  
И ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ 1 м<sup>3</sup> ДЫМА

Характеристика топлива (в %):  $C^P = 35,37$ ;  $H^P = 4,26$ ;  $O^P = 29,26$ ;  $A^P = 0,7$

Показатели процесса горения	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 2,0$	
Воздух холодный . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1825	1721	1630	1407	1125
	кал/м <sup>3</sup>	731	678	634	524	407
Нагрев воздуха до 100° .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1877	1777	1686	1471	1211
	кал/м <sup>3</sup>	760	705	658	550	435
Нагрев воздуха до 200° .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1929	1833	1747	1535	1282
	кал/м <sup>3</sup>	784	730	685	578	464
Нагрев воздуха до 300° .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1980	1889	1806	1600	1353
	кал/м <sup>3</sup>	810	755	711	605	491
Нагрев воздуха до 400° .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2032	1944	1863	1662	1423
	кал/м <sup>3</sup>	835	782	739	634	520
Нагрев воздуха до 500° .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2084	1999	1920	1725	1495
	кал/м <sup>3</sup>	862	810	766	660	550

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ ТОРФА ( $W = 40\%$ ;  $Q_H^P = 2680$  кал/кг)  
И ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ 1 м<sup>3</sup> ДЫМА

Состав топлива (в %):  $C^P = 32,0$ ;  $H^P = 3,185$ ;  $S^P = 0,165$ ;  $N^P = 1,435$ ;  $O^P = 18,115$ ;  
 $A^P = 5,1$

Показатели процесса горения	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 2,0$	
Воздух холодный . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1713	1618	1533	1318	1068
	кал/м <sup>3</sup>	685	630	588	487	380
Нагрев воздуха до 100° .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1770	1675	1590	1384	1140
	кал/м <sup>3</sup>	710	656	611	514	409
Нагрев воздуха до 200° .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1821	1731	1649	1447	1212
	кал/м <sup>3</sup>	736	683	640	540	436

Показатели процесса горения		$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 2,0$
Нагрев воздуха до 300° .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	1873	1787	1708	1515	1285
	кал/м <sup>3</sup>	760	708	666	570	465
Нагрев воздуха до 400° .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	1917	1842	1769	1578	1357
	кал/м <sup>3</sup>	788	734	694	596	494
Нагрев воздуха до 500° .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	1978	1898	1823	1642	1445
	кал/м <sup>3</sup>	814	761	720	624	529

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ ДОНЕЦКОГО УГЛЯ „Д“

 $(Q^P = 5640 \text{ кал/кг})$  И ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ 1 м<sup>3</sup> ДЫМАСостав топлива (в %):  $C^P = 59,8$ ;  $H^P = 4,16$ ;  $S^P = 2,92$ ;  $N^P = 1,21$ ;  $O^P = 9,21$ ; $W^P = 9,7$ ;  $A^P = 13$ .

Показатели процесса горения		$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 2,0$
Воздух холодный . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	2105	1967	1848	1561	1234
	кал/м <sup>3</sup>	848	775	714	580	437
Нагрев воздуха до 100° .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	2168	2032	1913	1633	1308
	кал/м <sup>3</sup>	878	805	744	609	468
Нагрев воздуха до 200° .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	2240	2095	1980	1703	1394
	кал/м <sup>3</sup>	908	835	774	640	499
Нагрев воздуха до 300° .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	2292	2161	2046	1776	1471
	кал/м <sup>3</sup>	938	870	805	671	530
Нагрев воздуха до 400° .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	2354	2225	2112	1847	1549
	кал/м <sup>3</sup>	968	897	836	702	561
Нагрев воздуха до 500° .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	2416	2288	2180	1917	1628
	кал/м <sup>3</sup>	1000	929	868	784	593
Нагрев воздуха до 600° .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	2476	2351	2245	1983	1702
	кал/м <sup>3</sup>	1032	960	898	765	625
Нагрев воздуха до 700° .	$t_{\text{Тгор.}} (^{\circ}\text{C})$	2539	2415	2310	2059	1780
	кал/м <sup>3</sup>	1063	990	940	797	657



ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ ДОНЕЦКОГО УГЛЯ „Г“

( $Q^P = 6430 \text{ кал/кг}$ ) И ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ  $1 \text{ м}^3$  ДЫМА

Состав топлива (в %):  $C^P = 67,8$ ;  $H^P = 4,52$ ;  $S^P = 2,67$ ;  $N^P = 1,34$ ;  $O^P = 7,37$ ;

$W^P = 5,9$ ;  $A^P = 10,4$

Показатели процесса горения	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 2,0$	
Воздух холодный . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2162	2000	1874	1578	1247
	кал/кг	862	788	725	584	441
Нагрев воздуха до $100^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2202	2062	1940	1651	1326
	кал/кг	894	818	755	615	473
Нагрев воздуха до $200^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2264	2128	2007	1724	1406
	кал/кг	924	849	786	645	504
Нагрев воздуха до $300^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2326	2194	2074	1798	1484
	кал/кг	954	879	817	676	535
Нагрев воздуха до $400^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2387	2257	2141	1867	1564
	кал/кг	985	910	849	707	566
Нагрев воздуха до $500^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2450	2322	2208	1937	1640
	кал/кг	1016	940	879	740	598
Нагрев воздуха до $600^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2515	2884	2276	2011	1718
	кал/кг	1050	971	910	771	620
Нагрев воздуха до $700^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2578	2445	2342	2083	1794
	кал/кг	1080	1003	943	803	662

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ ПОДМОСКОВНОГО УГЛЯ

( $Q_H^P = 2980 \text{ кал/кг}$ ) И ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ  $1 \text{ м}^3$  ДЫМА

Состав топлива (в %):  $C^P = 34,73$ ;  $H^P = 2,43$ ;  $S^P = 2,53$ ;  $O^P = 9,41$ ;  $N^P = 0,7$ ;

$W^P = 32$ ;  $A^P = 18,2$

Показатели процесса горения	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 2,0$	
Воздух холодный . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1818	1707	1612	1377	1102
	кал/м <sup>3</sup>	725	667	618	508	392
Нагрев воздуха до $100^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1875	1769	1674	1445	1178
	кал/м <sup>3</sup>	751	695	646	536	420
Нагрев воздуха до $200^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1935	1829	1736	1514	1253
	кал/м <sup>3</sup>	780	722	673	565	450
Нагрев воздуха до $300^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	1996	1891	1799	1584	1326
	кал/м <sup>3</sup>	806	750	703	594	480
Нагрев воздуха до $400^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2049	1952	1860	1649	1397
	кал/м <sup>3</sup>	834	778	730	623	510
Нагрев воздуха до $500^\circ$ . . . . .	$t_{\text{Тгор.}} (^\circ\text{C})$	2102	2012	1922	1714	1477
	кал/м <sup>3</sup>	863	806	758	651	540

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ И ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ 1 м³ ДЫМА ПРИ ГОРЕНИИ ОЧИЩЕННОГО ГАЗА ИЗ ДРОВ

Состав газа (в %): CO = 2,3; C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> = 0,5; CH<sub>4</sub> = 2,5; H<sub>2</sub> = 13; CO<sub>2</sub> = 7; N<sub>2</sub> = 49

Показатели процессов горения	α = 1,0			α = 1,1			α = 1,2			α = 1,5			α = 2,0		
	при нагреве			при нагреве			при нагреве			при нагреве			при нагреве		
	ОДНОГО ГАЗА	ОДНОГО ВОЗД.	ВОЗД. И ГАЗА	ОДНОГО ГАЗА	ОДНОГО ВОЗД.	ВОЗД. И ГАЗА	ОДНОГО ГАЗА	ОДНОГО ВОЗД.	ВОЗД. И ГАЗА	ОДНОГО ГАЗА	ОДНОГО ВОЗД.	ВОЗД. И ГАЗА	ОДНОГО ГАЗА	ОДНОГО ВОЗД.	ВОЗД. И ГАЗА
Газ и воздух холодные															
	$t_{\text{гор.}} (^{\circ}\text{C})$														
Нагрев до 100°															
	$\text{кал./м}^3$	1830	1838	1871	1748	1761	1794	1673	1687	1719	1481	1507	1535	1243	1280
Нагрев до 200°															
	$\text{кал./м}^3$	1863	1880	1947	1782	1807	1872	1703	1735	1801	1511	1560	1616	1268	1341
Нагрев до 300°															
	$\text{кал./м}^3$	1898	1922	2023	1816	1851	1945	1737	1785	1876	1540	1613	1693	1294	1401
Нагрев до 400°															
	$\text{кал./м}^3$	1933	1964	2098	1850	1897	2026	1772	1831	1964	1571	1663	1778	1320	1463
Нагрев до 500°															
	$\text{кал./м}^3$	1969	2007	2177	1884	1941	2106	1806	1900	2031	1601	1715	1860	1345	1523
Нагрев до 600°															
	$\text{кал./м}^3$	2006	2049	2254	1919	1986	2182	1838	1942	2110	1629	1773	1942	1371	1586
Нагрев до 700°															
	$\text{кал./м}^3$	2042	2091	2331	1954	2032	2259	1871	1977	2180	1659	1827	2022	1398	1646

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ И ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ 1 м<sup>3</sup> ДЫМА ПРИ ГОРЕНИИ ГАЗА ИЗ КАМЕННОГО УГЛЯ

Состав газа (в %): CO = 25; C<sub>п</sub>H<sub>м</sub> = 0,5; CH<sub>4</sub> = 3; H<sub>2</sub> = 13; CO<sub>2</sub> = 4,5; N<sub>2</sub> = 54

Показатели процесса горения	α = 1,0			α = 1,1			α = 1,2			α = 1,5			α = 2,0				
	при нагрев			при нагрев			при нагрев			при нагрев			при нагрев				
	газа	газа и возд.	газа и возд.	газа	газа и возд.	газа и возд.	газа	газа и возд.	газа и возд.	газа	газа и возд.	газа и возд.	газа	газа и возд.	газа и возд.		
Газ и воздух холодные . . . . .	—			—			—			—			—				
	t <sub>г.гор.</sub> (°C)			1768			1688			1616			1429				
λ <sub>адл.</sub> , м <sup>2</sup>			688			648			615			528			430		
Нагрев до 100° . . . . .	1806	1811	1845	1721	1723	1766	1648	1664	1696	1459	1483	1512	1223	1259	1284		
	t <sub>г.гор.</sub> (°C)			724			629			630			561			464	
λ <sub>адл.</sub> , м <sup>2</sup>			703			662			650			550			438		
Нагрев до 200° . . . . .	1838	1855	1924	1755	1779	1844	1681	1711	1773	1488	1537	1592	1218	1320	1369		
	t <sub>г.гор.</sub> (°C)			760			644			684			597			497	
λ <sub>адл.</sub> , м <sup>2</sup>			720			718			720			572			448		
Нагрев до 300° . . . . .	1873	1895	2000	1789	1823	1921	1714	1757	1851	1518	1591	1677	1274	1381	1456		
	t <sub>г.гор.</sub> (°C)			795			657			720			631			531	
λ <sub>адл.</sub> , м <sup>2</sup>			736			754			720			595			457		
Нагрев до 400° . . . . .	1909	1938	2074	1824	1868	1999	1746	1803	1930	1549	1644	1757	1300	1443	1542		
	t <sub>г.гор.</sub> (°C)			830			672			755			668			567	
λ <sub>адл.</sub> , м <sup>2</sup>			753			790			700			618			470		
Нагрев до 500° . . . . .	1945	1981	2150	1858	1912	2077	1779	1850	2010	1580	1696	1837	1326	1504	1627		
	t <sub>г.гор.</sub> (°C)			870			686			792			703			602	
λ <sub>адл.</sub> , м <sup>2</sup>			770			826			720			640			480		
Нагрев до 600° . . . . .	1982	2024	2227	1893	1957	2154	1813	1898	2089	1611	1749	1917	1352	1566	1710		
	t <sub>г.гор.</sub> (°C)			905			720			827			740			637	
λ <sub>адл.</sub> , м <sup>2</sup>			786			861			740			664			490		
Нагрев до 700° . . . . .	2019	2065	2308	1927	2003	2233	1847	1946	2166	1642	1803	2000	1380	1632	1799		
	t <sub>г.гор.</sub> (°C)			943			717			865			777			675	
λ <sub>адл.</sub> , м <sup>2</sup>			805			900			762			688			501		

ТАБЛИЦА КОЛИЧЕСТВА ГАЗА, ПРОТЕКАЮЩЕГО ПО ГАЗОПРОВОДУ

Внутр. диаметр газопровода, мм	Скорость газа, $\nu$ , м/сек																				
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
30	12,7	15,3	17,8	20,4	22,9	25,4	28,0	30,6	33,1	35,6	38,2	40,7	43,3	45,8	48,4	50,9	53,5	56,0	58,5	61,1	63,6
40	12,96	15,6	18,3	21,0	23,7	26,4	29,1	31,8	34,5	37,2	39,9	42,6	45,3	48,0	50,7	53,4	56,1	58,8	61,5	64,2	66,9
50	13,6	16,3	19,0	21,7	24,4	27,1	29,8	32,5	35,2	37,9	40,6	43,3	46,0	48,7	51,4	54,1	56,8	59,5	62,2	64,9	67,6
60	14,3	17,0	19,7	22,4	25,1	27,8	30,5	33,2	35,9	38,6	41,3	44,0	46,7	49,4	52,1	54,8	57,5	60,2	62,9	65,6	68,3
70	15,0	17,7	20,4	23,1	25,8	28,5	31,2	33,9	36,6	39,3	42,0	44,7	47,4	50,1	52,8	55,5	58,2	60,9	63,6	66,3	69,0
80	15,7	18,4	21,1	23,8	26,5	29,2	31,9	34,6	37,3	40,0	42,7	45,4	48,1	50,8	53,5	56,2	58,9	61,6	64,3	67,0	69,7
90	16,4	19,1	21,8	24,5	27,2	29,9	32,6	35,3	38,0	40,7	43,4	46,1	48,8	51,5	54,2	56,9	59,6	62,3	65,0	67,7	70,4
100	17,1	19,8	22,5	25,2	27,9	30,6	33,3	36,0	38,7	41,4	44,1	46,8	49,5	52,2	54,9	57,6	60,3	63,0	65,7	68,4	71,1
125	18,5	21,2	23,9	26,6	29,3	32,0	34,7	37,4	40,1	42,8	45,5	48,2	50,9	53,6	56,3	59,0	61,7	64,4	67,1	69,8	72,5
150	19,9	22,6	25,3	28,0	30,7	33,4	36,1	38,8	41,5	44,2	46,9	49,6	52,3	55,0	57,7	60,4	63,1	65,8	68,5	71,2	73,9
175	21,3	24,0	26,7	29,4	32,1	34,8	37,5	40,2	42,9	45,6	48,3	51,0	53,7	56,4	59,1	61,8	64,5	67,2	69,9	72,6	75,3
200	22,7	25,4	28,1	30,8	33,5	36,2	38,9	41,6	44,3	47,0	49,7	52,4	55,1	57,8	60,5	63,2	65,9	68,6	71,3	74,0	76,7
225	24,1	26,8	29,5	32,2	34,9	37,6	40,3	43,0	45,7	48,4	51,1	53,8	56,5	59,2	61,9	64,6	67,3	70,0	72,7	75,4	78,1
250	25,5	28,2	30,9	33,6	36,3	39,0	41,7	44,4	47,1	49,8	52,5	55,2	57,9	60,6	63,3	66,0	68,7	71,4	74,1	76,8	79,5
275	26,9	29,6	32,3	35,0	37,7	40,4	43,1	45,8	48,5	51,2	53,9	56,6	59,3	62,0	64,7	67,4	70,1	72,8	75,5	78,2	80,9
300	28,3	31,0	33,7	36,4	39,1	41,8	44,5	47,2	49,9	52,6	55,3	58,0	60,7	63,4	66,1	68,8	71,5	74,2	76,9	79,6	82,3
325	29,7	32,4	35,1	37,8	40,5	43,2	45,9	48,6	51,3	54,0	56,7	59,4	62,1	64,8	67,5	70,2	72,9	75,6	78,3	81,0	83,7
350	31,1	33,8	36,5	39,2	41,9	44,6	47,3	50,0	52,7	55,4	58,1	60,8	63,5	66,2	68,9	71,6	74,3	77,0	79,7	82,4	85,1
375	32,5	35,2	37,9	40,6	43,3	46,0	48,7	51,4	54,1	56,8	59,5	62,2	64,9	67,6	70,3	73,0	75,7	78,4	81,1	83,8	86,5
400	33,9	36,6	39,3	42,0	44,7	47,4	50,1	52,8	55,5	58,2	60,9	63,6	66,3	69,0	71,7	74,4	77,1	79,8	82,5	85,2	87,9
425	35,3	38,0	40,7	43,4	46,1	48,8	51,5	54,2	56,9	59,6	62,3	65,0	67,7	70,4	73,1	75,8	78,5	81,2	83,9	86,6	89,3
450	36,7	39,4	42,1	44,8	47,5	50,2	52,9	55,6	58,3	61,0	63,7	66,4	69,1	71,8	74,5	77,2	79,9	82,6	85,3	88,0	90,7
475	38,1	40,8	43,5	46,2	48,9	51,6	54,3	57,0	59,7	62,4	65,1	67,8	70,5	73,2	75,9	78,6	81,3	84,0	86,7	89,4	92,1
500	39,5	42,2	44,9	47,6	50,3	53,0	55,7	58,4	61,1	63,8	66,5	69,2	71,9	74,6	77,3	80,0	82,7	85,4	88,1	90,8	93,5
550	42,3	45,0	47,7	50,4	53,1	55,8	58,5	61,2	63,9	66,6	69,3	72,0	74,7	77,4	80,1	82,8	85,5	88,2	90,9	93,6	96,3
600	45,1	47,8	50,5	53,2	55,9	58,6	61,3	64,0	66,7	69,4	72,1	74,8	77,5	80,2	82,9	85,6	88,3	91,0	93,7	96,4	99,1
650	47,9	50,6	53,3	56,0	58,7	61,4	64,1	66,8	69,5	72,2	74,9	77,6	80,3	83,0	85,7	88,4	91,1	93,8	96,5	99,2	101,9
700	50,7	53,4	56,1	58,8	61,5	64,2	66,9	69,6	72,3	75,0	77,7	80,4	83,1	85,8	88,5	91,2	93,9	96,6	99,3	102,0	104,7
750	53,5	56,2	58,9	61,6	64,3	67,0	69,7	72,4	75,1	77,8	80,5	83,2	85,9	88,6	91,3	94,0	96,7	99,4	102,1	104,8	107,5
800	56,3	59,0	61,7	64,4	67,1	69,8	72,5	75,2	77,9	80,6	83,3	86,0	88,7	91,4	94,1	96,8	99,5	102,2	104,9	107,6	110,3
850	59,1	61,8	64,5	67,2	69,9	72,6	75,3	78,0	80,7	83,4	86,1	88,8	91,5	94,2	96,9	99,6	102,3	105,0	107,7	110,4	113,1
900	61,9	64,6	67,3	70,0	72,7	75,4	78,1	80,8	83,5	86,2	88,9	91,6	94,3	97,0	99,7	102,4	105,1	107,8	110,5	113,2	115,9
950	64,7	67,4	70,1	72,8	75,5	78,2	80,9	83,6	86,3	89,0	91,7	94,4	97,1	99,8	102,5	105,2	107,9	110,6	113,3	116,0	118,7
1 000	67,5	70,2	72,9	75,6	78,3	81,0	83,7	86,4	89,1	91,8	94,5	97,2	99,9	102,6	105,3	108,0	110,7	113,4	116,1	118,8	121,5

Примечание. Для нахождения часовой количества газа, протекающего через газопровод, в случае когда диаметр его больше 1000 мм и в пределах от 1000 до 10 000 мм, надо найти в таблице диаметр в 10 раз меньше заданного и найденное часовой количество газа при нужной скорости увеличить в 10 раз.  
 Пример. Необходимо определить часовой количество газа, протекающего со скоростью 9 м/сек. через газопровод диаметром 2500 мм. Имеем в таблице диаметр в 10 раз меньше заданного, т. е. равный 250 мм. Находим соответствующее часовой количество газа, протекающее через газопровод при скорости 9 м/сек., оно равно по таблице 1590 м³. Увеличим найденное число в 100 раз, получим искомое количество газа и равное, следовательно, 159.000 м³.час.

ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗОВ — с кал./м<sup>3</sup> °С

°С	Двух- атомн.	СО	Н <sub>2</sub> О	СН <sub>4</sub>	°С	Двух- атомн.	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> О
0	0,311	0,388	0,372	0,436	1 500	0,327	0,504	0,430
50	0,311	0,393	0,372	0,450	1 550	0,328	0,507	0,434
100	0,311	0,398	0,372	0,463	1 600	0,328	0,510	0,437
150	0,311	0,402	0,372	0,477	1 650	0,329	0,512	0,442
200	0,312	0,407	0,373	0,490	1 700	0,330	0,515	0,446
250	0,312	0,412	0,374	0,503	1 750	0,331	0,517	0,450
300	0,312	0,416	0,374	0,517	1 800	0,332	0,519	0,455
350	0,312	0,421	0,375	0,530	1 850	0,333	0,522	0,459
400	0,313	0,426	0,376	0,544	1 900	0,334	0,524	0,464
450	0,313	0,430	0,377	0,557	1 950	0,336	0,526	0,469
500	0,314	0,434	0,378	0,570	2 000	0,337	0,528	0,474
550	0,314	0,438	0,380	0,584	2 050	0,338	0,530	0,479
600	0,314	0,443	0,381	0,597	2 100	0,339	0,532	0,484
650	0,315	0,447	0,383	0,610	2 150	0,340	0,534	0,490
700	0,316	0,451	0,385	0,624	2 200	0,341	0,535	0,495
750	0,316	0,454	0,387	0,637	2 250	0,342	0,537	0,501
800	0,317	0,458	0,389	0,651	2 300	0,344	0,538	0,506
850	0,317	0,462	0,391	0,664	2 350	0,345	0,540	0,512
900	0,318	0,466	0,393	0,677	2 400	0,346	0,541	0,518
950	0,318	0,470	0,395	0,691	2 450	0,348	0,543	0,524
1 000	0,319	0,473	0,398	0,704	2 500	0,349	0,544	0,531
1 050	0,320	0,476	0,400	0,718	2 550	0,350	0,545	0,537
1 100	0,320	0,480	0,403	0,731	2 600	0,352	0,546	0,544
1 150	0,321	0,483	0,406	0,744	2 650	0,353	0,547	0,550
1 200	0,322	0,486	0,409	0,758	2 700	0,354	0,548	0,557
1 250	0,322	0,490	0,412	—	2 750	0,356	0,549	0,564
1 300	0,323	0,493	0,415	—	2 800	0,357	0,550	0,571
1 350	0,324	0,496	0,419	—	—	—	—	—
1 400	0,325	0,499	0,422	—	—	—	—	—
1 450	0,326	0,501	0,426	—	—	—	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ ГАЗОВ — I кал./м<sup>3</sup>

°С	Двух- атомн.	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> О	СН <sub>4</sub>	°С	Двух- атомн.	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> О
0	0,00	0,00	0,00	0,00	1 500	489,95	756,37	644,38
50	15,54	19,64	18,59	24,49	1 550	507,67	785,74	671,87
100	31,10	39,77	37,21	46,32	1 600	525,51	815,32	699,90
150	46,69	60,37	55,86	78,49	1 650	543,49	845,01	728,55
200	62,30	81,45	74,58	99,99	1 700	561,59	874,84	757,83
250	77,95	102,98	93,39	125,84	1 750	579,83	903,77	787,77
300	93,64	124,96	112,29	155,02	1 800	598,21	934,80	818,31
350	109,36	147,37	131,32	185,54	1 850	616,74	964,94	849,63
400	125,13	170,20	150,47	217,40	1 900	635,15	995,15	881,66
450	140,95	193,44	169,78	250,60	1 950	654,23	1025,4	914,35
500	156,80	217,09	189,25	285,14	2 000	673,20	1055,8	947,70

°С	Двух-атомн.	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> О	СН <sub>4</sub>	°С	Двух-атомн.	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> О
550	172,73	241,12	208,91	321,02	2 050	692,34	1086,2	981,91
600	188,71	265,53	228,81	358,23	2 100	711,63	1116,6	1016,8
650	204,74	290,30	248,95	396,79	2 150	731,09	1147,0	1052,6
700	220,84	315,43	269,32	436,68	2 200	750,71	1177,5	1089,1
750	237,01	340,90	289,92	477,91	2 250	770,51	1207,9	1126,5
800	253,25	366,71	310,86	520,48	2 300	790,48	1238,4	1164,8
850	269,56	392,83	332,07	564,39	2 350	810,63	1268,8	1203,9
900	285,95	419,26	353,61	609,64	2 400	830,95	1299,2	1243,9
950	302,42	445,99	375,51	656,22	2 450	851,48	1329,6	1284,8
1 000	318,98	473,00	397,77	704,15	2 500	872,18	1359,9	1326,5
1 050	335,62	500,29	420,42	753,41	2 550	893,08	1390,1	1369,3
1 100	352,36	527,84	443,48	804,02	2 600	914,15	1420,3	1413,0
1 150	369,20	555,64	456,93	855,96	2 650	935,46	1450,3	1457,8
1 200	386,12	583,89	480,82	909,24	2 700	956,94	1480,3	1503,5
1 250	403,16	611,96	515,17	—	2 750	978,65	1510,1	1550,2
1 300	420,29	640,45	539,95	—	2 800	1000,5	1539,9	1597,9
1 350	437,54	669,14	565,24	—	—	—	—	—
1 400	454,89	698,06	591,11	—	—	—	—	—
1 450	472,37	727,10	617,46	—	—	—	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ДЛЯ НИЖНИХ КАМЕР КРУГЛЫХ ФАРФОРОВЫХ ГОРНОВ

(по испытаниям Оргфарфорстекло, 1935—1936 г.)

№№ по порядку	Наименование обжигаемых изделий	Заводы и №№ горнов	Расход тепла в % от полной теплопроизводительности топлива					
			на нагревание изделий	на нагревание капселей	потеря тепла с отходящими газами	потеря тепла от химической неполноты горения	прорыв топлива через колосниковую решетку	потери тепла на нагревание кладки печи и излучение в окружающую среду
1	Столовая посуда	Им. Коминтерна № 1	2,40	8,60	61,50	4,70	0,50	22,30
2	Изоляторы	" " № 2	3,48	5,55	61,70	4,07	0,50	24,70
3	Столовая посуда	" " № 3	2,00	7,60	67,60	не опр.	0,50	22,30
4	Изоляторы	" " № 4	3,80	5,00	54,20	10,70	0,50	25,80
5	"	" " № 5	3,90	7,70	59,20	1,60	0,50	27,10
6	"	" " № 7	4,50	5,20	52,30	9,20	0,50	28,30
7	Чайная посуда	Дмитровский № 3	1,40	8,40	58,50	8,00	0,50	23,10
8	" (тонкий черепок)	" " № 5	1,90	10,20	59,00	3,50	0,5	24,90
9	Фарфор азиатского ассортимента	Первомайский № 2	2,10	9,10	54,40	6,90	1,00	26,50
10	То же	" " № 4	2,10	9,70	56,40	6,90	2,10	22,80
11	Чайная и столовая посуда	Дулевский № 6	2,10	10,20	59,60	6,60	2,00	19,50

ПОТЕРИ ТЕПЛА ОТ ХИМИЧЕСКОЙ НЕПОЛНОТЫ ГОРЕНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ ДРОВ (ВЛАЖНОСТЬ 40%) С РАЗНЫМ ИЗБЫТКОМ ВОЗДУХА (Т. Е. РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ  $RO_2 + CO$  В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ)

Содержание $CO$ в дымовых газах в % Содержание $RO_2 + CO$ в дымовых газах в %	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
	Теплопотери в %, от теплопроизводительности топлива							
10	3,50	7,00	14,00	21,00	28,00	35,00	42,00	49,00
11	3,18	6,35	12,70	19,50	25,60	31,70	38,10	44,45
12	2,92	5,83	11,66	17,50	23,33	29,16	34,98	40,77
13	2,69	5,38	10,76	16,14	21,62	26,80	32,27	37,68
14	2,55	5,10	10,20	15,30	20,40	25,50	30,60	35,70
15	2,33	4,66	9,32	13,96	18,64	23,30	27,96	32,62
16	2,19	4,37	8,74	13,11	17,48	21,85	26,22	30,59
17	2,06	4,12	8,24	12,36	16,48	20,60	24,72	28,84
18	1,95	3,89	7,78	11,67	15,56	19,45	23,34	27,23
19	1,84	3,68	7,36	11,10	14,72	18,40	22,80	25,76
20	1,75	3,50	7,00	10,5	14,00	17,50	21,00	24,35

ПОТЕРИ ТЕПЛА ОТ ХИМИЧЕСКОЙ НЕПОЛНОТЫ ГОРЕНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ ТОРФА (ВЛАЖНОСТЬ 40%) С РАЗНЫМ ИЗБЫТКОМ ВОЗДУХА (Т. Е. РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ  $RO_2 + CO$  В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ)

Содержание $CO$ в дымовых газах в % Содержание $RO_2 + CO$ в дымовых газах в %	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
	Теплопотери в %, от теплопроизводительности топлива								
10	3,34	6,68	13,36	20,04	26,72	33,40	40,08	46,76	53,44
11	3,03	6,07	12,14	18,21	24,28	30,35	36,43	42,50	48,56
12	2,78	5,57	11,14	16,71	22,28	27,85	33,42	38,99	44,56
13	2,57	5,64	10,28	15,42	20,56	25,70	30,84	35,98	41,12
14	2,38	4,77	9,54	14,31	19,08	23,85	28,62	33,39	38,16
15	2,22	4,45	8,90	13,35	17,80	22,25	26,70	31,15	35,60
16	2,08	4,17	8,35	12,52	16,70	20,87	25,04	29,21	33,40
17	1,96	3,93	7,86	11,79	15,72	19,65	23,58	27,51	31,54
18	1,83	3,67	7,34	11,01	14,68	18,35	22,02	25,69	29,36
19	1,75	3,51	7,02	10,53	14,04	17,55	21,06	24,57	28,08
20	1,67	3,34	6,68	10,02	13,36	16,70	20,04	23,38	26,72

ПАРАМЕТРЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

$$d \frac{\text{г воды}}{\text{кг абс. сух. возд.}} \text{ — влагосодержание. Примерно — } d = \frac{623}{\frac{745}{\varphi \cdot p_{\text{H}}} - 1};$$

$$J \frac{\text{кал}}{\text{кг абс. сух. возд.}} \text{ — теплосодержание. Примерно — } J = 0,240 t + \lambda_{\text{вод. пар}} \frac{d}{1000};$$

$t \text{ } ^\circ\text{C}$ \diagdown		$\varphi \text{ } \%$					
		0	10	20	30	40	
$\lambda = 596,8$	0 {	$d$	0,00	0,38	0,77	1,15	1,53
		$J$	0,00	0,23	0,46	0,69	0,91
		$\gamma$	1,267	1,267	1,266	1,265	1,265
		$B_0$	—	1,982	1,981	1,980	1,979
$\lambda = 599,1$	5 {	$d$	0,00	0,55	1,09	1,64	2,19
		$J$	1,20	1,53	1,85	2,18	2,51
		$\gamma$	1,245	1,245	1,245	1,244	1,243
		$B_0$	—	1,983	1,984	1,983	1,982
$\lambda = 601,4$	10 {	$d$	0,00	0,77	1,54	2,31	3,09
		$J$	2,39	2,86	3,32	3,78	4,25
		$\gamma$	1,223	1,222	1,222	1,221	1,220
		$B_0$	—	1,987	1,986	1,986	1,985
$\lambda = 603,7$	15 {	$d$	0,00	1,07	2,14	3,22	4,30
		$J$	3,59	4,24	4,88	5,54	6,19
		$\gamma$	1,202	1,201	1,200	1,199	1,198
		$B_0$	—	1,991	1,990	1,990	1,988
$\lambda = 605,9$	20 {	$d$	0,00	1,47	2,94	4,42	5,91
		$J$	4,79	5,68	6,57	7,47	8,37
		$\gamma$	1,181	1,181	1,180	1,178	1,177
		$B_0$	—	1,995	1,994	1,993	1,991
$\lambda = 608,2$	25 {	$d$	0,00	1,99	3,99	6,01	8,04
		$J$	5,99	7,20	8,42	9,64	10,88
		$\gamma$	1,161	1,160	1,159	1,157	1,155
		$B_0$	—	2,002	2,001	1,999	1,997
$\lambda = 610,5$	30 {	$d$	0,00	2,67	5,36	8,08	10,82
		$J$	7,19	8,82	10,46	12,12	13,79
		$\gamma$	1,142	1,140	1,138	1,137	1,134
		$B_0$	—	2,008	2,007	2,005	2,003
$\lambda = 612, \sim$	35 {	$d$	0,00	3,55	7,13	10,76	14,43
		$J$	8,39	10,56	12,76	14,98	17,23
		$\gamma$	1,123	1,121	1,119	1,116	1,114
		$B_0$	—	2,017	2,015	2,012	2,009
$\lambda = 615,0$	40 {	$d$	0,00	4,66	9,40	14,20	19,07
		$J$	9,58	12,45	15,37	18,32	21,31
		$\gamma$	1,105	1,103	1,098	1,096	1,093
		$B_0$	—	2,025	2,022	2,018	2,015



ПРИ ДАВЛЕНИИ 745 мм рт. ст.

$\gamma \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$  — удельный вес,  $\gamma = \frac{1 + \frac{d}{1000}}{v_0} v_0, d, J$  (взяты из „Известий Теплотехнического ин-та, № 1, 1927 г.).

$$B_0 = \frac{1 + \frac{d}{1000}}{A_0 \gamma (1 + dt)}; A_0 = \frac{\Delta d}{\Delta t};$$

$$B = B_0 \frac{\lambda_{en} - \vartheta}{\lambda_{en}}; \vartheta — \text{температура материала.}$$

50	60	70	75	80	90	100
1,92 1,15 1,265 1,977	2,30 1,37 1,265 1,976	2,69 1,61 1,265 1,974	2,88 1,72 1,265 1,974	3,07 1,83 1,265 1,973	3,46 2,06 1,265 1,972	3,85 2,30 1,264 1,970
2,74 2,84 1,243 1,980	3,29 3,17 1,242 1,979	3,85 3,50 1,241 1,977	4,13 3,66 1,240 1,977	4,40 3,83 1,240 1,976	4,95 4,16 1,240 1,975	5,51 4,50 1,240 1,973
3,87 4,72 1,220 1,983	4,65 5,19 1,219 1,981	5,43 5,66 1,219 1,980	5,82 5,90 1,219 1,979	6,21 6,13 1,218 1,978	7,00 6,60 1,217 1,977	7,78 7,08 1,216 1,975
5,38 6,84 1,198 1,986	6,47 7,50 1,196 1,985	7,56 8,16 1,195 1,983	8,11 8,49 1,195 1,982	8,66 8,82 1,194 1,981	9,76 9,48 1,194 1,980	10,86 10,15 1,193 1,978
7,41 9,28 1,176 1,989	8,91 10,19 1,175 1,988	10,42 11,10 1,173 1,986	11,18 11,56 1,173 1,985	11,94 12,02 1,173 1,984	13,46 12,95 1,171 1,982	15,00 13,88 1,171 1,980
10,08 12,12 1,154 1,995	12,14 13,37 1,153 1,993	14,21 14,63 1,152 1,992	15,25 15,76 1,152 1,990	16,29 15,89 1,151 1,989	18,39 17,17 1,149 1,987	20,50 18,43 1,146 1,985
13,59 15,48 1,132 2,001	16,37 17,18 1,131 1,998	19,19 18,90 1,129 1,997	20,61 19,77 1,128 1,995	22,03 20,63 1,127 1,994	24,89 22,38 1,125 1,992	27,78 24,14 1,123 1,990
18,14 19,50 1,111 2,007	21,90 21,80 1,109 2,004	25,70 24,13 1,106 2,003	27,62 25,31 1,105 2,001	29,54 26,48 1,104 2,000	33,43 28,86 1,101 1,998	37,37 31,27 1,100 1,995
24,03 24,36 1,090 2,013	29,05 27,45 1,087 2,010	34,16 30,59 1,084 2,008	36,74 32,18 1,082 2,006	39,35 33,78 1,081 2,005	44,60 37,02 1,077 2,003	49,98 40,31 1,074 2,000

$t$ °C	$\varphi$ °,0	0	10	20	30	40	
		$d$					
$\lambda = 617,2$	45 {	$J$	0,00	6,07	12,27	18,58	25,03
		$\gamma$	10,78	14,53	18,36	22,25	26,23
		$B_0$	1,088	1,084	1,080	1,076	1,072
			—	2,030	2,028	2,024	2,021
$\lambda = 619,5$	50 {	$d$	0,00	7,84	16,88	24,13	32,60
		$J$	11,98	16,84	21,82	26,93	32,18
		$\gamma$	1,074	1,066	1,061	1,056	1,050
		$B_0$	—	2,035	2,033	2,030	2,027
$\lambda = 621,7$	55 {	$d$	0,00	10,05	20,43	31,15	42,24
		$J$	13,18	19,43	25,89	32,55	39,45
		$\gamma$	1,054	1,048	1,043	1,036	1,030
		$B_0$	—	2,044	2,040	2,035	2,033
$\lambda = 623,9$	60 {	$d$	0,00	12,78	26,10	39,98	54,48
		$J$	14,38	22,36	30,67	39,33	48,98
		$\gamma$	1,038	1,030	1,023	1,016	0,007
		$B_0$	—	2,053	2,046	2,040	2,038
$\lambda = 626,1$	65 {	$d$	0,00	16,14	33,15	51,08	70,02
		$J$	15,58	25,70	36,35	47,58	59,43
		$\gamma$	1,023	1,013	1,003	0,994	0,984
		$B_0$	—	2,060	2,053	2,045	2,043
$\lambda = 628,3$	70 {	$d$	0,00	20,27	41,90	65,03	89,83
		$J$	16,78	29,53	43,13	57,56	73,24
		$\gamma$	1,008	0,996	0,985	0,973	0,961
		$B_0$	—	2,068	2,059	2,050	2,047
$\lambda = 630,5$	75 {	$d$	0,00	25,30	52,74	82,60	115,21
		$J$	17,99	33,95	51,26	70,09	90,64
		$\gamma$	0,994	0,979	0,965	0,960	0,936
		$B_0$	—	2,071	2,060	2,050	2,046
$\lambda = 632,7$	80 {	$d$	0,00	31,41	66,15	104,77	147,96
		$J$	19,19	39,08	61,07	85,51	112,82
		$\gamma$	0,980	0,962	0,945	0,926	0,909
		$B_0$	—	2,075	2,062	2,050	2,044
$\lambda = 634,9$	85 {	$d$	0,00	38,84	82,83	133,07	190,95
		$J$	20,39	45,07	73,02	104,92	141,55
		$\gamma$	0,966	0,945	0,923	0,902	0,881
		$B_0$	—	2,076	2,061	2,046	2,039
$\lambda = 637,0$	90 {	$d$	0,00	47,81	103,54	169,34	248,12
		$J$	21,59	52,09	87,61	129,53	179,69
		$\gamma$	0,974	0,927	0,902	0,877	0,851
		$B_0$	—	2,078	2,060	2,042	2,034
$\lambda = 639,1$	95 {	$d$	0,00	58,68	129,55	216,75	326,60
		$J$	22,79	60,35	105,69	161,43	231,61
		$\gamma$	0,953	0,918	0,879	0,849	0,819
		$B_0$	—	2,073	2,053	2,035	2,026

50	60	70	75	80	90	100
31,60 30,29 1,069 2,019	38,31 34,43 1,064 2,016	45,15 38,65 1,061 2,014	48,63 40,79 1,058 2,012	52,14 42,96 1,056 2,011	59,28 47,36 1,052 2,008	66,57 51,86 1,048 2,006
41,29 37,56 1,048 2,025	50,21 43,08 1,041 2,022	59,38 48,76 1,035 2,020	64,06 51,66 1,032 2,018	68,75 54,59 1,030 2,017	78,47 60,58 1,026 2,014	88,42 66,74 1,021 2,012
53,70 46,57 1,023 2,030	65,57 53,94 1,017 2,028	77,86 61,58 1,010 2,026	84,18 65,51 1,007 2,024	90,60 69,49 1,004 2,022	103,80 77,69 0,998 2,020	117,50 86,18 0,991 2,018
69,61 57,81 0,995 2,035	85,44 67,68 0,992 2,033	102,00 78,01 0,984 2,031	110,58 83,37 0,980 2,030	119,35 88,82 0,976 2,029	137,54 100,15 0,969 2,026	156,64 112,05 0,961 2,024
89,95 71,90 0,976 2,039	111,26 85,24 0,965 2,036	133,77 99,32 0,956 2,034	145,48 106,02 0,951 2,032	157,69 114,27 0,945 2,030	183,15 130,19 0,937 2,027	210,31 147,15 0,927 2,025
116,33 89,88 0,949 2,043	145,16 107,98 0,932 2,039	176,15 127,43 0,925 2,036	192,60 137,76 0,919 2,034	209,73 148,49 0,913 2,032	246,21 171,37 0,902 2,029	285,99 196,30 0,890 2,025
150,96 113,17 0,922 2,040	190,31 137,95 0,908 2,036	233,85 165,37 0,892 2,031	257,40 180,19 0,884 2,029	282,25 195,84 0,878 2,027	336,37 229,89 0,864 2,022	397,29 268,20 0,850 2,018
196,55 143,54 0,892 2,038	251,62 178,35 0,874 2,033	314,53 218,05 0,857 2,027	349,10 239,37 0,849 2,024	387,06 263,90 0,841 2,021	471,60 317,27 0,824 2,016	571,34 380,22 0,806 2,010
258,35 184,40 0,860 2,032	337,78 234,77 0,840 2,025	432,75 294,96 0,818 2,019	487,50 329,65 0,807 2,015	548,25 368,15 0,798 2,010	691,72 459,03 0,778 2,005	874,65 574,83 0,757 1,995
344,13 240,80 0,827 2,026	463,62 316,82 0,801 2,018	616,33 413,93 0,776 2,010	709,00 473,06 0,764 2,006	818,24 542,29 0,752 2,001	1 097,51 719,78 0,728 1,994	1 508,85 981,00 0,704 1,986
469,12 322,62 0,790 2,018	661,27 463,27 0,760 2,009	934,27 619,45 0,731 2,002	1 123,50 735,00 0,716 1,996	1 352,19 886,63 0,702 1,991	2 071,68 1 344,84 0,673 1,983	3 601,74 2 320,34 0,644 1,974

ТАБЛИЦА УПРУГОСТИ ВОДЯНОГО ПАРА И СОДЕРЖАНИЕ ВЛАГИ В 1 М<sup>3</sup> СУХОГО И ВЛАЖНОГО ГАЗА (ВОЗДУХА) ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ НАСЫЩЕНИЯ

t°	e	g		l		K	t'	e'	g		l		K
		Содержание влаги г/м <sup>3</sup> газа (возд.) при 0° и 760 мм		Содержание влаги л/м <sup>3</sup> газа (возд.) при γ=0,804					Содержание влаги г/м <sup>3</sup> газа (возд.) при 0° и 760 мм		Содержание влаги л/м <sup>3</sup> газа (возд.) при 0° и 760 мм		
		сухого	влажн.	сухого	влажн.				сухого	влажн.	сухого	влажн.	
20	17,5	18,9	18,5	23,5	23,0	0,977	—	—	—	—	—	—	—
21	18,7	20,3	19,8	25,2	24,6	0,875	46	75,7	89,0	80,2	110,5	99,8	0,901
22	19,8	21,5	20,9	26,7	26,0	0,974	47	79,6	94,1	84,3	116,9	104,9	0,896
23	21,1	22,9	22,3	28,4	27,7	0,972	48	83,7	99,5	88,6	123,6	110,2	0,891
24	22,4	24,4	23,7	30,3	29,4	0,970	49	88,0	105,3	93,1	131,0	115,8	0,885
25	23,8	26,0	25,2	32,3	31,3	0,969	50	92,5	111,4	97,9	138,5	121,8	0,879
26	25,2	27,6	26,6	34,3	33,1	0,967	51	97,2	118	103	147	128	0,873
27	26,7	29,3	28,2	36,4	35,1	0,965	52	102,1	125	108	155	134	0,866
28	28,3	31,1	29,9	38,6	37,2	0,963	53	107,2	132	113	164	140	0,860
29	30,0	33,0	31,7	41,0	39,4	0,961	54	112,5	139	119	173	147	0,853
30	31,8	35,1	33,6	43,6	41,8	0,959	55	118,0	148	125	184	155	0,845
31	33,7	37,3	35,6	46,4	44,3	0,956	56	123,8	150	131	194	163	0,838
32	35,7	39,6	37,7	49,2	46,9	0,953	57	129,8	165	137	205	171	0,831
33	37,7	41,9	39,9	52,0	49,6	0,951	58	136,1	175	144	217	179	0,822
34	39,9	44,5	42,2	56,3	52,5	0,948	59	142,6	185	151	230	188	0,813
35	42,2	47,3	44,6	58,7	55,5	0,945	60	149,4	196	158	244	197	0,803
36	44,6	50,1	47,1	62,3	58,5	0,942	61	156,4	208	165	259	206	0,793
37	47,1	53,1	49,8	66,0	61,9	0,938	62	163,8	220	173	274	215	0,783
38	49,7	56,3	52,6	70,0	65,5	0,934	63	171,4	234	181	291	225	0,772
39	52,4	59,5	55,4	74,0	68,9	0,931	64	179,3	249	189	309	235	0,761
40	55,3	63,1	58,5	78,5	72,6	0,927	65	188,5	263	198	327	246	0,751
41	58,3	66,8	61,6	83,0	76,6	0,924	66	196,1	280	206	348	257	0,740
42	61,5	70,8	65,0	88,0	80,8	0,920	67	205,0	297	216	370	268	0,729
43	64,3	74,9	68,6	93,1	85,4	0,915	68	214,2	315	226	392	281	0,717
44	68,3	79,3	72,2	98,6	89,8	0,911	69	223,7	335	236	416	293	0,705
45	71,9	84,0	76,0	104,3	94,5	0,906	70	233,7	356	246	443	306	0,692

ПАРАМЕТРЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Величина  $B = B_0 \cdot \frac{\lambda - \vartheta}{\lambda}$  (для расчета циркуляции в сушилах),  $B_0$  — см. приложение 14,

$\vartheta$  — температура материала, которая принята равной температуре мокрого термометра психрометра (по таблице Теплотехнического института),

$\lambda$  — теплосодержание водяного пара при данной температуре.

φ % \ t° C	20	30	40	50	60	70	75	80	90	100
0	—	—	1,99	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,97	1,97
5	—	—	1,98	1,97	1,97	1,97	1,96	1,96	1,96	1,96
10	—	—	1,97	1,96	1,96	1,95	1,95	1,95	1,95	1,94
15	—	—	1,95	1,95	1,95	1,94	1,94	1,94	1,93	1,93

t° C	φ 0,0									
	20	30	40	50	60	70	75	80	90	100
20	—	—	1,94	1,94	1,94	1,93	1,93	1,93	1,92	1,91
25	—	—	1,94	1,93	1,93	1,92	1,92	1,92	1,91	1,90
30	—	—	1,93	1,92	1,92	1,91	1,91	1,91	1,90	1,90
35	—	—	1,93	1,92	1,91	1,90	1,90	1,89	1,89	1,88
40	1,95	1,93	1,92	1,91	1,90	1,89	1,89	1,88	1,88	1,87
45	1,94	1,93	1,91	1,90	1,89	1,88	1,88	1,88	1,87	1,86
50	1,94	1,92	1,90	1,89	1,88	1,88	1,87	1,87	1,86	1,85
55	1,94	1,91	1,90	1,89	1,88	1,87	1,87	1,86	1,85	1,84
60	1,93	1,91	1,89	1,88	1,87	1,86	1,85	1,85	1,84	1,83
65	1,93	1,90	1,88	1,87	1,86	1,85	1,84	1,83	1,82	1,81
70	1,92	1,89	1,87	1,86	1,84	1,83	1,83	1,82	1,81	1,80
75	1,91	1,88	1,86	1,84	1,83	1,81	1,81	1,80	1,79	1,78
80	1,90	1,87	1,85	1,83	1,81	1,80	1,79	1,78	1,77	1,76
85	1,89	1,86	1,83	1,81	1,79	1,77	1,77	1,76	1,75	1,73
90	1,88	1,84	1,81	1,79	1,77	1,75	1,74	1,74	1,72	1,71
95	1,86	1,82	1,79	1,77	1,77	1,73	1,72	1,71	1,70	1,68

## ПРИЛОЖЕНИЕ 17

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ  
(по каталожным данным)

Скорость воздуха в выходном отверстии вентилятора в м/сек	Диаметр колеса в мм	Производительность вентилятора в м³/час	Статическое давление в мм вод. ст.							
			20		40		60		80	
			число оборотов n	мощность в л. с. N	число оборотов n	мощность в л. с. N	число оборотов n	мощность в л. с. N	число оборотов n	мощность в л. с. N
12,0	200	1 100	1 560	0,21	1 950	0,36	2 340	0,50	2 620	0,64
16,0	200	1 470	1 860	0,44	2 130	0,57	2 470	0,75	2 760	0,93
20,0	200	1 830	2 190	0,80	2 400	1,02	2 660	1,07	2 920	1,29
12,0	300	2 500	1 040	0,48	1 300	0,81	1 560	1,12	1 750	1,44
16,0	300	3 320	1 240	0,98	1 420	1,28	1 640	1,67	1 840	2,10
20,0	300	3 440	1 460	1,80	1 600	2,30	1 770	2,40	1 950	2,90
12,0	400	4 320	725	0,87	960	1,45	1 120	1,95	1 270	2,47
16,0	400	5 760	830	1,45	1 025	2,12	1 180	2,95	1 325	3,64
20,0	400	7 200	950	2,36	1 125	3,30	1 265	4,18	1 400	5,10
12,0	500	6 900	580	1,12	740	1,85	895	2,75	1 030	3,50
16,0	500	9 215	660	1,75	795	2,67	917	4,00	1 070	5,15
20,0	500	11 520	750	3,20	870	4,50	980	6,30	1 130	7,15
12,0	650	11 664	444	1,94	567	3,16	668	4,40	755	5,62
16,0	650	15 452	503	3,32	615	4,95	709	6,60	790	8,21
20,0	650	19 340	570	5,33	670	7,38	757	9,40	835	11,48

Скорость воздуха в выходном отверстии вентилятора в м/сек	Диаметр колеса в мм	Производительность вентилятора в м <sup>3</sup> /час	Статическое давление в мм вод. ст.							
			20		40		60		80	
			число оборотов n	мощность в л. с. N	число оборотов n	мощность в л. с. N	число оборотов n	мощность в л. с. N	число оборотов n	мощность в л. с. N
12,0	800	17 690	355	2,95	454	4,82	535	6,70	605	8,55
16,0	800	23 590	402	5,05	492	7,55	565	10,05	636	12,60
20,0	800	29 490	456	8,10	536	11,20	608	14,28	670	17,40
12,0	950	24 960	295	4,15	378	6,80	444	9,45	503	12,20
16,0	950	33 280	334	7,05	408	10,60	471	14,10	525	17,62
20,0	950	41 600	380	11,45	446	15,85	504	20,20	555	24,60
12,0	1 100	33 444	250	5,56	320	9,10	378	12,65	426	16,20
16,0	1 100	44 592	284	9,60	348	14,25	400	19,00	448	23,70
20,0	1 100	55 740	323	15,40	380	21,30	428	27,20	474	33,00
12,0	1 400	54 190	192	9,10	245	14,80	288	20,60	326	26,30
16,0	1 400	72 250	217	15,50	266	23,00	307	30,70	345	38,30
20,0	1 400	90 320	246	24,80	689	34,40	328	44,00	364	53,50
12,0	1 700	79 900	155	13,30	197	21,70	233	30,50	265	38,60
16,0	1 700	106 540	175	22,80	215	34,00	249	45,30	278	56,90
20,0	1 700	133 170	200	36,50	235	50,80	267	64,90	295	79,90
12,0	2 000	110 592	132	18,40	169	30,50	199	41,75	225	53,50
16,0	2 000	147 456	150	31,60	183	47,25	211	62,90	236	78,20
20,0	2 000	184 320	170	50,60	200	70,00	226	89,50	248	109,10

## ПРИЛОЖЕНИЕ 18

## НУМЕРАЦИЯ ПИРОСКОПОВ ПО ОСТ 7665

Нумерация пироскопов по ОСТ	Температура падения пироскопов по ОСТ в °С	Нумерация пироскопов по ОСТ	Температура падения пироскопов по ОСТ в °С
60(022)	600	83(013)	835
63(021)	635	85(012)	855
66(020)	665	88(011)	880
69(019)	690	90(010)	900
71(018)	710	92(09)	920
74(017)	740	93(08)	935
76(016)	760	96(07)	960
79(015)	790	98(06)	980
81(014)	815	100(05)	1 000

Примечание. Цифры в скобках относятся к старой, отмененной нумерации (конуса Зегера).

Нумерация пироскопов по ОСТ	Температура падения пироскопов по ОСТ в °С	Нумерация пироскопов по ОСТ	Температура падения пироскопов по ОСТ в °С
102(04)	1 020	150(18)	1 500
104(03)	1 040	152(19)	1 520
106(02)	1 060	154(20)	1 540
108(01)	1 080	158(26)	1 580
110(1)	1 100	161(27)	1 610
112(2)	1 120	163(28)	1 630
114(3)	1 140	165(29)	1 650
116(4)	1 160	167(30)	1 670
118(5)	1 180	169(31)	1 690
120(6)	1 200	171(32)	1 710
123(7)	1 230	173(33)	1 730
125(8)	1 250	175(34)	1 750
128(9)	1 280	177(35)	1 770
130(10)	1 300	179(36)	1 790
132(11)	1 320	182(37)	1 820
135(12)	1 350	185(38)	1 850
138(13)	1 380	188(39)	1 880
141(14)	1 410	192(40)	1 920
143(15)	1 430	196(41)	1 960
146(16)	1 460	200(42)	2 000
148(17)	1 480		

Примечание. Цифры в скобках относятся к старой, отмененной нумерации (конуса Зегера).

## ЛИТЕРАТУРА

### На русском языке

- Ауфгейзер Д. Топливо и его горение. Энергоиздат, 1933.  
Гинзбург Д. Б. Газогенераторные установки. Гизлегпром, М.—Л., 1937.  
Грёбер Г. Введение в теорию теплопередачи. ГТИ, М., 1933.  
Грум-Гржимайло В. Е. Пламенные печи. ОНТИ, Л.—М., 1932.  
Гуревич А. М. Сжигание кускового торфа. Энергоиздат, 1932.  
Доброхотов Н. Н. Расчет газогенераторов и генераторного процесса.  
Иванцов Г. Расчет естественной циркуляции в сушилах многократного насыщения.  
М., 1928.  
Кирш К. В. Антрацит как топливо котельных. М., 1925.  
Кирш К. В. Дрова как топливо. М., 1919.  
Кнорре Г. Ф. Курс топочных процессов. Энергоиздата 1933.  
Лемлек И. М. Рекуператоры для нагревательных печей. Энергоиздат, 1933.  
Лурье М. Ю. Сушильное дело, Кубуч, Л. 1934.  
Мак-Ги Э. и Симпсон Г. Теплоемкость керамических материалов и масс при обжиге. ГНТИ, М., 1930.  
Маковецкий А. Е. и Ройтман Г. Л. Сушка воздухом, дымовыми газами и паром. ГТИ, 1925.  
Моугиней М. Заводские печи. ГНТИ, 1932.  
Нессельштраус. Пирометры в заводском деле. М., 1926.  
Нохратян К. А. Сушилки. ГНТИ, 1938.  
Окнов М. Т. Топливо и его сжигание. Кубуч, Л., 1931.  
Рамзин Л. Расчет сушилок и I-d-диаграмма. ИТИ, М., 1927.  
Рафалович И. М. Рационализация типовых печей металлопромышленности. ИВТИ, 1930.  
Ратшель-Браббе. Отопление и вентиляция. Униздат, 1928.  
Тен-Бош. Теплопередача. М., 1930.  
Тренклер Г. Техника промышленных топков. БИНТ, 1931.  
Тринкс В. Промышленные печи, ч. I, ЛНТИ, Л., 1928; ч. II, ОНТИ, 1934.  
Чернобаев Д. Топливо, его горение и общие методы расчета заводских печей. ГТИУ, 1931.  
Шак А. и Руммель. Практическое приложение законов теплопередачи и теплового лученспускания. Госиздат, 1928.  
Шматолла. Печи для обжига кирпича, извести, цемента, магнезита, фарфора.

### Журнальная литература

#### „Керамика и стекло“

1925 год

- Алексеев В. Исследование работы французских с обратным пламенем печей. 9, 10, 11.  
Беркман А. С. Использование тепла в керамической промышленности. 12.  
Безбородов М. А. Давление газов в фарфоровом горне. 9.  
Гинзбург Д. Б. Измерение давлений и тяги на стекольных заводах. 12.  
Грум-Гржимайло В. Е. Фарфоровые горны. 6.  
Зубчанинов В. О некоторых статьях расхода тепла в тепловых балансах фарфоровых и фаянсовых горнов. 5.  
Искюль В. И. Отношение каолинита к высоким температурам. 1—2.



- Келер Э. Опытные электрические криптоловые печи. 12.  
Корбановский Р. Однократный обжиг белого и художественного товара в туннельной печи. 6.  
Корнилов С. М. Обжиг фарфора. 1—2.  
Лысин Б. С. Отношение фарфоровых масс к обжигу. 10.  
Лысин Б. С. Первый в СССР опыт обжига фарфора на жидком топливе. 10.  
Туманов С. Г. Недостатки фарфора и меры борьбы с ними. 10.  
Туманов С. Г. Недостатки фаянса и меры борьбы с ними. 11.  
Швецов Б. С., Гинзбург Д. Б., Кузмич Б. Ф. Обследование теплового хозяйства Песоченской фаянсовой фабрики. 1, 2, 3, 4.

1926 год

- Будников П. П. К теории образования фарфора. 1.  
Булавин И. А. Использование горнового пространства в печах фарфоро-фаянсового производства. 12.  
Иванов-Городов Н. Н. Тепловой баланс туннельного горна. 8—9.  
Корбановский Р. Краткая записка о ходе и результате работ по обжигу изоляционного фарфора на нефтяном топливе. 12.  
Лысин Б. С. Первый в СССР опыт обжига фаянса на мазуте. 12.  
Струтинский Л. Б. К вопросу о строении фарфора. 6—7.

1927 год

- Сукачев В. В. Дефекты обжига фаянсовых изделий. 3—4.

1928 год

- Браун А. Горновая ведомость, как средство технического контроля. 4—5.  
Туманов С. Г. Производство фарфора в Германии. 2—3.

1929 год

- Айзенман Г. А. Использование отходящего тепла керамических печей. 7—8.  
Будников П. П. и Ендовитский В. И. О сушке полуфабриката в керамическом деле. 4.  
Емельянов Н. Построение теплового хозяйства новой фабрики Сибфарфор. 4.  
Овчининский А. Уплотнение заборки фарфоровых изделий в литой камере горна. 7—8.  
Пономарев И. Ф. Схема процесса образования фарфора. 1.  
Айзенман Г. А. К вопросу о рекуператорах и регенераторах керамических печей. 6.  
Беркман А. С. Производство фаянсовой посуды в Соединенных штатах. 10.  
Биленкин А. и Штандель А. Туннельные печи системы Ленгерсдорф и газогенераторная станция Пантелеймоновского динасового завода. 7—8.  
Гинзбург Д. Б. К работе газогенератора системы Вельман. 6.  
Пулиезо С. Г. Цек в муфельном обжиге на изделиях из опочного фаянса. 6.  
Слободяник И. А. Механизация засыпки топлива в печах при обжиге керамических изделий. 5.

1931 год

- Ничипоренко С. Туннельная печь Дресслер. 1.

1932 год

- Беркман А. С. Применение электрического обжига в керамической промышленности. 8.  
Норкин Н. Туннельные печи в керамической промышленности. 2.  
Норкин Н. Конструкция и теплотехнические характеристики туннельных печей. 3.  
Шапиро М. Л. Электрические туннельные печи. 5—6.

1934 год

- Ковельман Г. А. Перевод круглых горнов на отопление газом. 3.  
Пузанов П. Сжигание фрезерного торфа в горнах для обжига фарфора. 10.

- Скворцов П. С. Полугенеративные топки системы проф. Грум-Гржимайло на круглых фарфоровых горнах. 8.  
 Щукин А. Методика определения расхода топлива при проектировании промышленных печей. 3.  
 Юрчак И. Я. Причины деформации плоских фарфоровых изделий при обжиге. 10.

1935 год

- Базилевич А. Расчет расхода топлива для периодических печей. 1.  
 Ковельман Г. А. Новшества в устройстве фарфоро-фаянсовых печей и сушил. 6

1936 год

- Брунш Ю. Ю. Применение антрацита для обжига изделий керамической промышленности. 10.  
 Щукин А. А. О выборе рациональных размеров круглых горнов для обжига фарфоровых изделий. 10.

### На иностранных языках

- Hermansen A. Industriel Furnace Technique. London, 1929.  
 Steger W. Wärme Wirtschaft in der keramischen Industrie. Dresden, 1927.

### Журнальная литература

#### *Ceramik Industry*

1. Оборудование и печи фарфорового завода Homer Laughlin. 1930, 4, 408—417.
2. Кольцевая печь для декорировочного обжига Holcroft & Co. 1933, 9.
3. Новая туннельная печь для санитарного фаянса. Swindell-Dressler Co. 1934, 10, 195.
4. Быстрый обжиг изоляторов для автосвеч в туннельных печах. C. F. Greene. 1934, 8, 72.
5. Огнеупорная изоляция керамических печей. H. Christman. 1934, 8, 81—83.
6. Кольцевая туннельная печь для политого обжига. Allied-Engineering Co. 1934, 7, 368.
7. Новая туннельная печь типа Дресслера. Swindell-Dressler Co. 1935, 9, 144—146.
8. Новейшее оборудование туннельных печей. G. Klein. 1932, 18 (6), 368—370.
9. Применение металлов в керамических печах. C. Williams. 1932, 18 (5), 308—310.
10. Оборудование и печи завода Lepox Inc. 1930, 14 (5), 538—540.
11. Малая туннельная печь для обжига чувствительных красок. Harrop Co. 1932, 18 (1), 28—29.
12. Непрерывно действующие газовые печи для утильного и политого обжига. Electric Furnace Co. 1932, 18 (2), 133.
13. Небольшая муфельная печь Дресслер. P. Dressler. 1932, 18 (4), 264.

#### *Journal of the American Ceramic Society*

1. Тепловые балансы некоторых керамических печей. H. Mansur. 1931, v. 14, № 2, 89—124.
2. Применение принципа обратной тяги в туннельных печах. W. Richardson. 1931, v. 14, № 8, 572—577.
3. Утильный и политый обжиг без капсул. P. Dressler. 1930, v. 13, № 2, 143—150.
4. Смазка в туннельных печах. Robson. 1932, v. 15, № 8, 451—456.
5. Газогенераторы для кокса в керамике. H. Barrett, 1929, v. 12, № 7, 435—442.
6. Расчеты сушилок. Carruthers. 1931, v. 14, № 1, 8—21.
7. Сушка и сушилки. Robson 1931, v. 14, № 10, 709—716.
8. Туннельная печь для быстрого обжига. A. Donnenwirth. 1930, v. 13, № 11, 865—870.
9. Оборудование и смазка туннельных вагонеток. H. Spurrier. 1930, v. 13, № 12, 929—930.
10. Увеличение производительности туннельных сушилок. W. Richardson. 1929, v. 12, № 12, 761—764.
11. Туннельные печи с колосниковыми топками. G. Kent. 1931, v. 14, № 9, 640—642.
12. Силлиманитовые огнеупоры для печей. Riddle. 1931, v. 14, № 12, 877—884.
13. Прокурка и ее регулирование. J. Carruthers. 1935, v. 18, № 4, 113—117.
14. Современные туннельные сушилки с использованием тепла. T. W. Garve. 1933, v. 16, № 2, 118—123.
15. Изоляция промышленных печей. J. Keller. 1934, v. 17, № 4, 77—87.
16. Муфельные печи высокой производительности. F. Norton. 1933, v. 16, № 3, 152—153.

17. Новые испытания туннельных печей. W. Richardson. 1934, v. 17, № 9, 279—282.
18. Коэффициент полезного действия керамических печей. F. Whitaker. 1935, v. 14, № 6, 194—197.
19. Быстрый обжиг полуфарфора. Robson. 1933, v. 16, № 7, 296—299.
20. Влияние продолжительности обжига на свойства некоторых фарфоровых черепков. A. Watts. 1936, v. 19, № 6, 175.
21. Напряжение в сводах круглых горнов. J. N. Goodier. 1933, v. 16, № 5, 220—228.

#### *Bull. American Ceramic Society*

1. Угольное отопление керамических печей. E. Lovejoy. 1934, v. 13, № 7, 176—177.
2. Муфельный обжиг. A. Blume. 1935, v. 14, № 1, 20—21.
3. Основные правила керамического обжига. J. Doyle. 1935, v. 14, № 6, 189—193.
4. Физика и химия керамического обжига. J. Austin. 1935, v. 14, № 5, 157—165.
5. Непрерывная электрическая декоративная печь. J. Hepplewhite. 1934, v. 13, № 2, 44—46.
6. Электрический обжиг фарфора. H. Masukowitz. 1935, v. 14, № 10, 337—341.
7. Электрические печи в керамической промышленности. J. Courtois. 1935, v. 14, № 10, 334—346.
8. Электрические печи для керамического обжига. E. Harris. 1935, v. 14, № 7, 219—222.
9. Новая конструкция туннельных печей для терракоты. W. Hull. 1934, v. 13, № 8, 196—200.
10. Обжиг периодических горнов. A. Blume. 1935, v. 14, № 19.
11. Обжиг муфельных горнов. A. Blume. 1935, v. 14, № 20.
12. Влияние давления на уплотнение и сушку некоторых керамических глин. A. Westman. 1933, v. 16, № 6, 256—264.

#### *Ceramik Age*

1. Сушка керамических изделий. W. Sibson. 1932, 19(5), 214—217.
2. Кольцевые туннельные печи на фарфоровом заводе China Company. J. B. Nealey. 1935, 8, 50—52.
3. Небольшая туннельная печь с газовым отоплением, A. Atkinson. 1932, 19 (6), 267—269.
4. Испытательная туннельная печь фирмы Lenox. L. S. Briggs. 1935, 1, 7—10.
5. Испытания по проектированию керамической электропечи непрерывного действия для обжига при высоких температурах. R. E. Gould and M. G. Toole. 1936, 4.

#### *Refractory Journal*

1. Обжиг фарфора в туннельных печах. Hentschel. 1931, 7 (9), 436.
2. Изоляция туннельных печей. C. Presswood. 1931, 7 (9), 411—415.
3. Туннельная печь Робертсона. R. Whitfield. 1930, 6 (62), 35—43.

#### *Brick Clay Record*

1. Газогенераторы. V. Windett. 1930, 76 (9), 583.
2. Газогенераторы. O. Scales. 1930, 76 (9), 583—584.
3. Небольшая сушилка. E. Pagett. 1933, 83 (3), 90—91.

#### *British Clay Worker*

1. Кольцевая туннельная печь системы Woodall. 1929/30, v. XXXVIII, № 451, 272—275.
2. Непрерывно действующие керамические печи. 1929/30, v. XXXVIII, № 451, 299—308.
3. Теория и практика сушки. 1931, 40 (475), 278—281.
4. Туннельная печь Монира. 1933, 42 (493), 51—52.

#### *Transactions Ceramic Society*

1. Конструкции главных каналов и дымоходов туннельных печей. S. Hind. 1934, v. XXXIII, № 12, 549—559.
2. Туннельная печь фирмы Carder. S. R. Hind. 1934, v. XXXIII, № 7, 274—297.
3. Газовые потоки в туннельных печах. S. Hind. 1932, № 5, 179—192.
4. Колебания температур в печи. R. Sarjant. 1932, № 3, 83—128.
5. Быстрая сушка фаянса. Конструкция сушилки. T. Simpson. 1934, v. XXXIII, № 3, 85—91.

6. Основы сушки глин. Н. Массеу, 1934, v. XXXIII, № 3, 92—103.
7. Ускорение сушки глин посредством коагуляции кислотой. Н. Массеу, 1935, v. XXXIV, № 9, 396—415.
8. Экономия топлива в керамической промышленности. F. Singer. 1934, № 6.
9. Некоторые условия керамического обжига. R. Sarjant, 1934, v. XXXIII, № 9, 331—51.
10. Непрерывно действующие керамические печи. E. Williamson. 1931, v. XXX, № 1, 21—32.
11. Регулирование циркуляции в туннельных печах. S. Hind. 1932, № 5, 179—192.
12. Керамический обжиг на нефти. E. Mills and S. Hind. 1930, v. XXIX, № 8, 211—269.
13. Керамический обжиг на нефти. S. Hind. 1930, v. XXIX, № 7, 149—168.
14. Непрерывная кольцевая туннельная печь Woodall. A. Tarrant. 1930, v. XXIX, № 9, 280—289.

#### *Ceramique*

1. Туннельные печи (обзор). R. Sylvanu. 1931, 34 (523), 249—269.
2. Испытания новейших туннельных печей и сушилок. V. Bodin. 1931, 34 (520), 146—154.
3. Кольцевая туннельная печь Woodall, A. Gamot. 1931, 34 (522), 236—244.
4. Туннельная печь с полной рекуперацией тепла. E. Damour. 1935, 38 (572), 235—245.
5. Автоматическое отопление туннельных печей. Prevost. 1932, 35, 229.
6. Кизельгуровая изоляция керамических печей. L. Augé. 1933, 33 (546), 217—220.
7. Новые методы отопления периодических печей. V. Bodin. 1935, 38 (568), 156—164.

#### *Berichte der Deutsch. Keramik Gesellschaft*

1. Электрическое отопление керамических печей. P. Gatzke. 1936, 6, 297—304.
2. Измерения температуры. W. Liesegang. 1933, 14 (4), 170—187.
3. Полочная конвейерная сушилка. G. Helm. 1932, 13 (10), 454—457.
4. Новые керамические печи и сушилки. H. Jordan. 1934, 15 (7), 357—369.
5. Новейшие американские керамические печи и сушилки. H. Jordan. 1934, 15 (7), 357—368.
6. Регулирование режима в туннельных печах при помощи измерительных приборов. W. Liesegang. 1932, 13 (1), 1—12.

#### *Sprechsaal*

1. Расход тепла в однокамерных керамических печах. J. Robitschek. 1930, № 19, 345—347, № 20, 361—364.
2. Указания для постройки электрических муфельных печей. R. Richter. 1931, № 43, 787—789.
3. Туннельные сушилки с вагонетками. C. Löser. 1931, № 44, 807—810.
4. Туннельная сушилка с вагонетками. C. Löser, II часть. 1932, № 13, 235—240.
5. Режим обжига фарфоровых горнов. L. Schellerer. 1934, № 52, 791—792.
6. Процессы керамического обжига. O. Krause. 1935, № 1—3, 1936, № 4—7.

#### *Keramische Rundschau*

1. Электрические печи для керамической промышленности. E. Schirm. 1931, №№ 44, 45, 46.
2. Новая небольшая американская туннельная печь. F. Singer. 1932, № 35, 453—454.
3. Керамические печи с отоплением естественным газом. H. Schantz. 1932, № 40, 18, 230—232.

#### *Tonindustrie Zeitung*

1. Огнеупоры для туннельных печей. A. Mendheimer. 1933, 57 (31—32), 369.

#### *Pottery Gazette*

1. Сушка фарфоровых и фаянсовых изделий. T. Simpson. 1934, 59 (680), 205—206.
2. Новая электрическая печь. Royle u. Brown. 1934, 59 (680), 203.
3. Политые туннельные печи. E. Wiedeman. 1933, 63 (28), 467—469.
4. Кольцевая туннельная печь Woodall. A. Tarrant. 1930, 55 (634), 648—649.

#### *Elektrowärme*

1. Электропечи для обжига керамических изделий, Michaelis. 1935, 5 (7), 162.

1. Нефтяные и электрические туннельные печи в керамической промышленности. P. Dressler. 1935, 4, 20—21.

### Патенты

1. Туннельная печь. P. Dressler. США. 1916363, 4 VII, 1933.
2. Туннельная печь. C. Colbert. США. 1917924, 11/VII, 1933.
3. Туннельные печи. J. Wedgwood s. Sons. Англия. 392839, 31/V, 1933; 391057, 26/IV, 1933; 390358, 12/IV, 1933.
4. Керамическая печь. H. Robertson. США. 1911089, 23/V, 1933.
5. Печи для плиток и т. д. G. Downing. Англия. 391175, 3/V, 1933.
6. Вагонетка для туннельных печей. H. Robertson. США. 1908186, 6/V, 1933.
7. Сушилка. W. Sibson, and H. Bechler. США. 1907220, 2/V, 1933.
8. Керамическая печь. L. Ladd. США. 1903118, 28/III, 1933.
9. Вагонеточная керамическая печь. J. Knapp Co. США. 1881683, 11/X, 1932.
10. Песочный затвор для туннельных печей. E. Forse. США. 1898042, 21/II, 1933.
11. Толкатель для вагонеток туннельной печи. Brit. Cer. Serv. Co. Англия. 414071, 9/III, 1934.
12. Электрическая муфельная печь. O. Jucker. Англия. 414643, 22/VIII, 1934.
13. Туннельная печь. S. M. Kier. США. 1970320, 14/VIII, 1934.
14. Туннельная печь. T. Shook. Англия. 414610, 17/VIII, 1934; 419535, 18/V, 1933.
15. Туннельные сушилки для плиток. A. Brown. Англия. 411838, 27/VI, 1934.
16. Туннельная печь. Harrop Cer. Serv. Co. США. 1965832, 10/VII, 1934.
17. Туннельная печь. H. Robertson. США. 1958448, 15/V, 1934.
18. Муфельная печь (J. Stein L-d). J. Hyslop. Англия. 406459, 7/III, 1934.
19. Туннельная печь. V. Veselik. Чехословакия. 9792—30, 18/XII, 1930.
20. Туннельная печь. Harrop Cer. Serv. Co. Англия. 404328, 24/I, 1934.
21. Туннельная печь. C. Dressler. Англия. 405143, 7/II, 1934; 400496, 1/XI, 1933.
22. Туннельная печь. W. Millor. США. 1934870, 14/XI, 1933.
23. Сушилка для тонкокерамических изделий. L. Mitschell. 422236, 4/XI, 1933.
24. Муфельные керамические печи. T. Adams. Англия. 21/XII, 1933.
25. Непрерывно действующие камерные печи. A. Habla. Англия. 425992, 25/IX, 1933.
26. Электрические керамические печи. Intern. Furn. Equipm. Co. Англия. 418751, 6/V, 1933.
27. Обжиг фарфора. J. Pollak. Англия. 417166, 9/XII, 1933.
28. Индуктивные электрические печи. G. Juhlin. Англия. 21/VII, 1935.
29. Вагонетки для туннельных печей. B. Moore. Англия. 433497, 28/VIII, 1935.
30. Муфельные печи. P. H. Dressler. Англия. 422985, 23/I, 1935.
31. Туннельная печь. B. Moore. Англия. 433637, 28/VIII, 1935.
32. Муфельная печь. F. Hartford. США. 2010261, 6/VIII, 1935.
33. Электрическая печь. A. Heyroth (Globar, Corp.). США. 2007605, 9/VII, 1935.
34. Вращающаяся печь с внутренним отоплением. A. Neumann. США. 1953856, 3/IV, 1934.
35. Коввейер для печей. L. Ladd. США. 2003450, 4/VI, 1935.
36. Печь. L. Ladd. США. 2003451, 4/VI, 1934.
37. Кольцевая туннельная печь. P. Dressler. США. 1999356, 30/IV, 1935.
38. Электрическая печь. W. Robertson. США. 1969038, 7/VIII, 1934.
39. Туннельная печь. A. Denus. Англия. 425401, 27/III, 1935.
40. Туннельная печь. P. Dressler. США. 1988837, 22/I, 1935.
41. Туннельная печь. Intern. Furn. Equipm. Англия. 418751, 14/XI, 1934.
42. Туннельная печь. Woodall L-td. Англия. 417934, 31/X, 1934.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
От автора . . . . .	3
Введение . . . . .	6
<b>Глава первая. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ СУШКЕ И ОБЖИГЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ . . . . .</b>	<b>12</b>
I. Сушка каолинов, глин и керамических масс . . . . .	12
1. Цель сушки (12). 2. Усадка керамических масс при сушке (16). 3. Движение влаги по капиллярам, испарение с поверхности (18). 4. Сушка керамических изделий (27).	
II. Изменение в обжиге керамических масс и входящих в их состав компонентов . . . . .	35
1. Каолинит и другие водные силикаты (35). 2. Кремнезем (42). 3. Плавни (44). 4. Керамические массы (51).	
<b>Глава вторая. ТОПЛИВО, ЕГО СЖИГАНИЕ И ГАЗИФИКАЦИЯ . . . . .</b>	<b>61</b>
I. Методы получения тепловой энергии и высоких температур . . . . .	61
II. Топливо . . . . .	62
1. Дрова (62). 2. Торф (65). 3. Каменный уголь (68). 4. Жидкое топливо (71). 5. Естественный горючий газ (72). 6. Обогащение топлива (сортировка, сушка и газификация (74).	
III. Некоторые положения и расчеты из теории горения и газификации дров (79). 3. Газификация твердого топлива (88).	77
<b>Глава третья. УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В КЕРАМИЧЕСКИХ ПЕЧАХ . . . . .</b>	<b>96</b>
I. Топки для твердого топлива . . . . .	96
1. Топки с колосниковой решеткой для сжигания дров (96). 2. Топки с колосниковыми решетками для сжигания кускового торфа (100). 3. Полугазовые топки (101).	
II. Устройство газогенераторов . . . . .	105
1. Газогенераторы для дров (105). 2. Газогенераторы для торфа (109). 3. Газогенераторы для торфа с вращающейся колосниковой решеткой (110). 4. Работа газогенератора на торфе и тепловой баланс (114).	
III. Устройства для сжигания газообразного топлива . . . . .	114
1. Сжигание газа и т. обования, предъявляемые к топочным устройствам (114). 2. Типы горелок, их устройство и особенности (118).	
IV. Устройства для сжигания жидкого топлива . . . . .	123
1. Принципы работы топок для жидкого топлива (123). 2. Механические форсунки (127). 3. Воздушные и паровые форсунки (128). 4. Топочные камеры для жидкого топлива (134).	
<b>Глава четвертая. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ГОРЯЧИХ ГАЗОВ ИЗДЕЛИЯМ В СУШИЛКАХ И ПЕЧАХ . . . . .</b>	<b>140</b>
I. Основные понятия и законы теплопередачи . . . . .	140
1. Передача тепла излучением (141). 2. Теплопроводность (147). 3. Теплопередача конвекцией (151).	
II. Теплообмен в сушилках и печах . . . . .	154
1. Условия теплообмена в керамических печах и сушилках (154). 2. Скорость сушки и обжига (158). 3. Природа пламени и распределение газов в печной камере (159). 4. Движение и работа горячих газов в печной камере (164).	

	Стр.
Глава пятая. ПЕЧИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ . . . . .	169
I. О классификации тепловых установок . . . . .	169
II. Прямоугольные и круглые печи с восходящим пламенем . . . . .	171
III. Печи с обратным пламенем . . . . .	172
IV. Круглые двухэтажные горны . . . . .	185
V. Круглые двухэтажные горны на газообразном топливе . . . . .	207

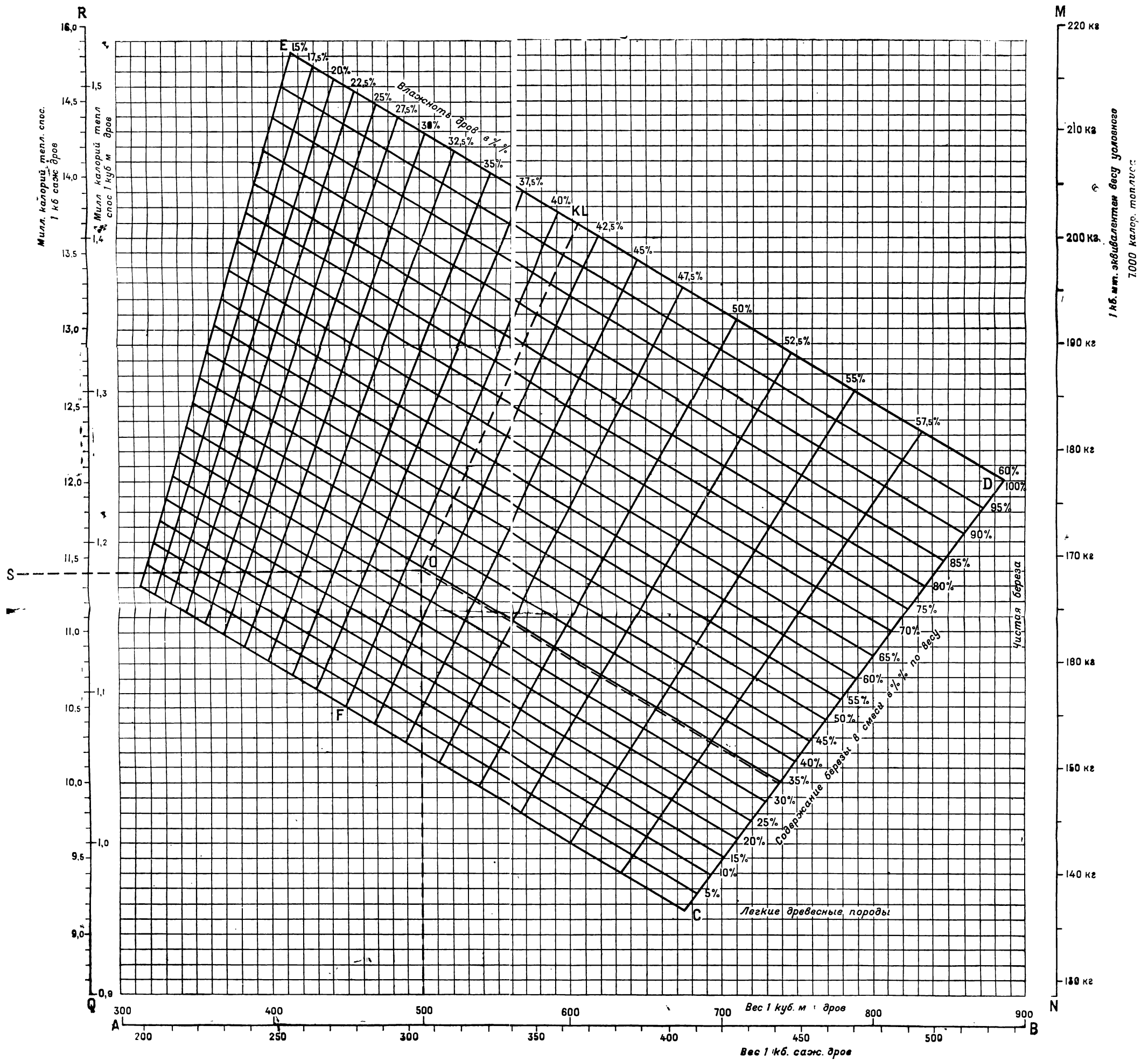
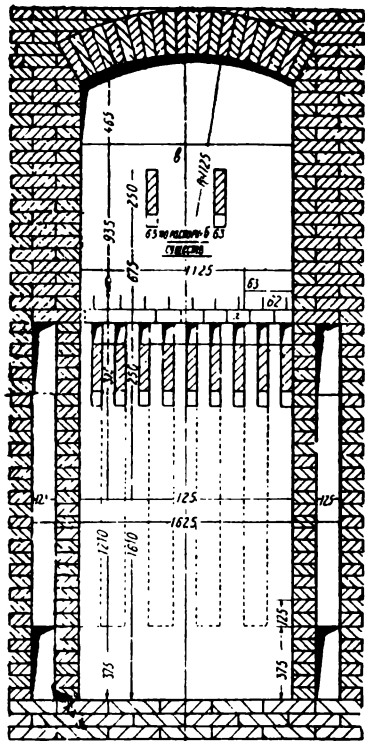


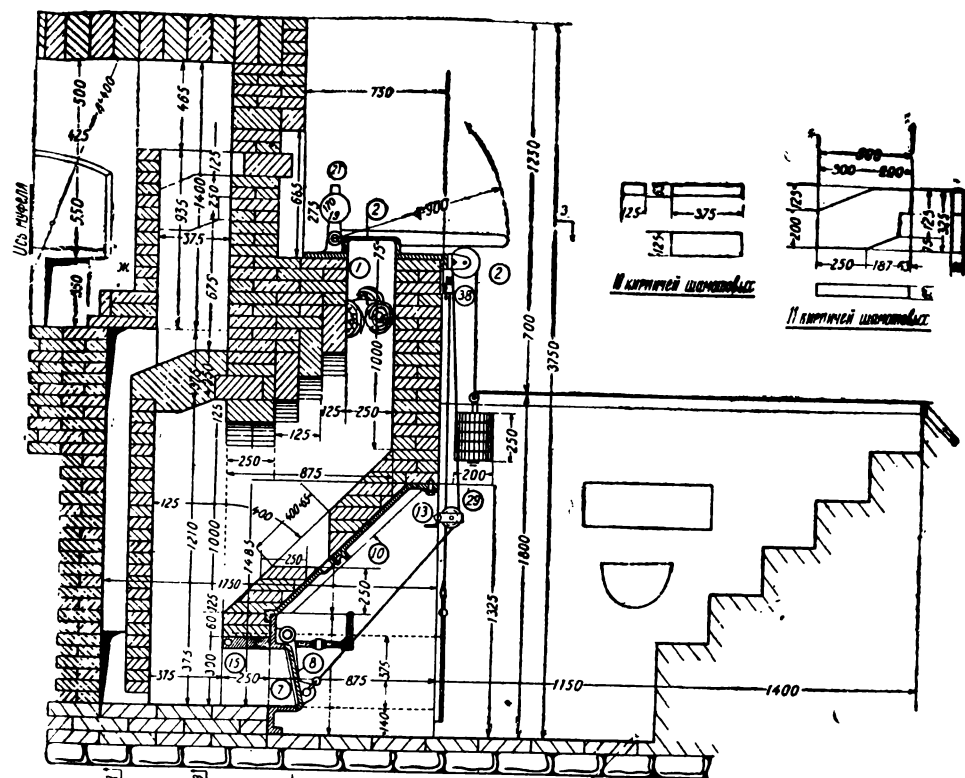
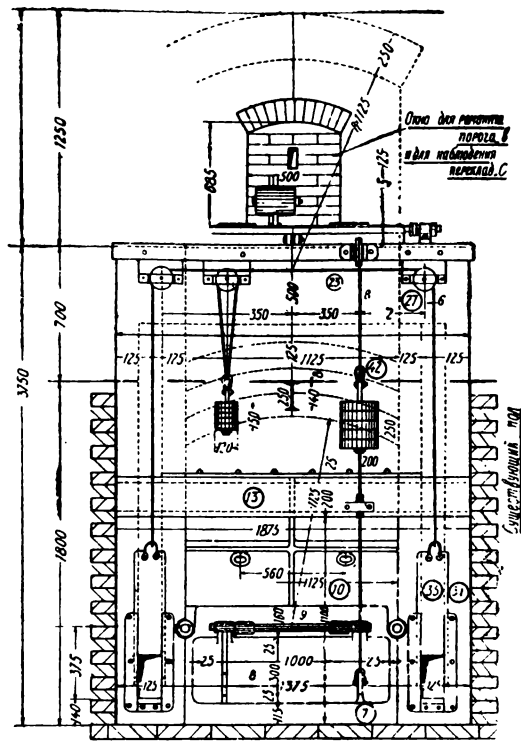
Рис. 33.



Разрез по В-Г



Разрез по НО



Разрез по Д-Е

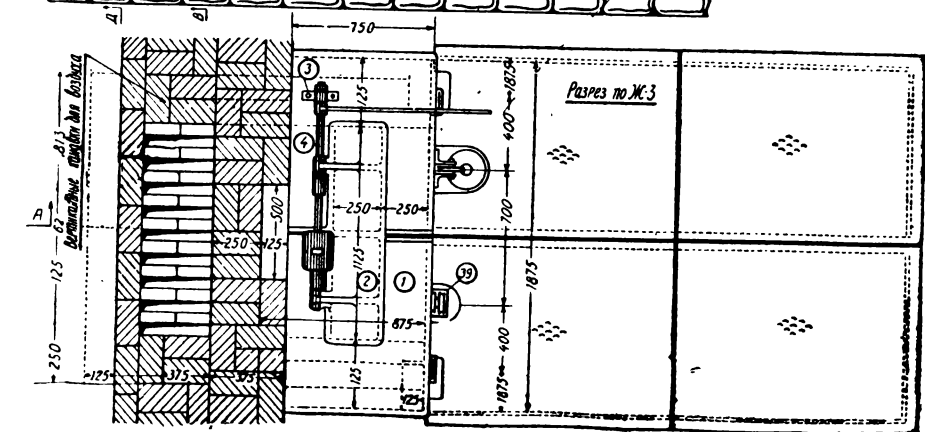
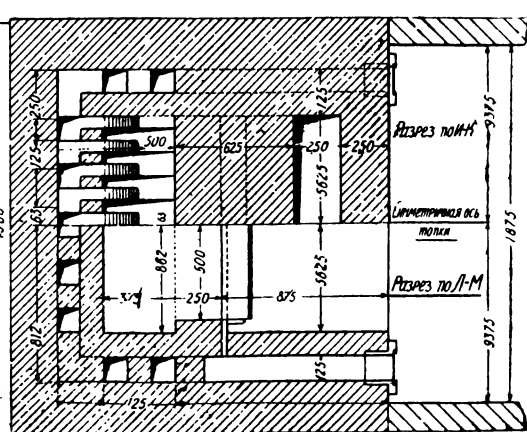
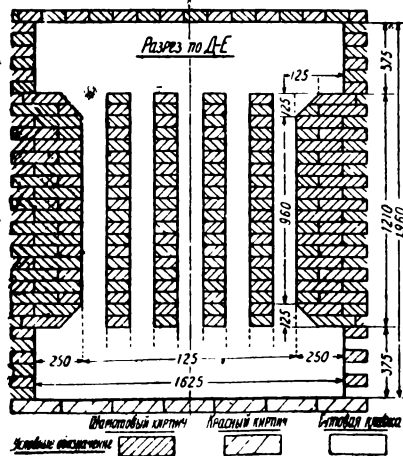


Рис. 42. Полугазовая топка муфельной печи.



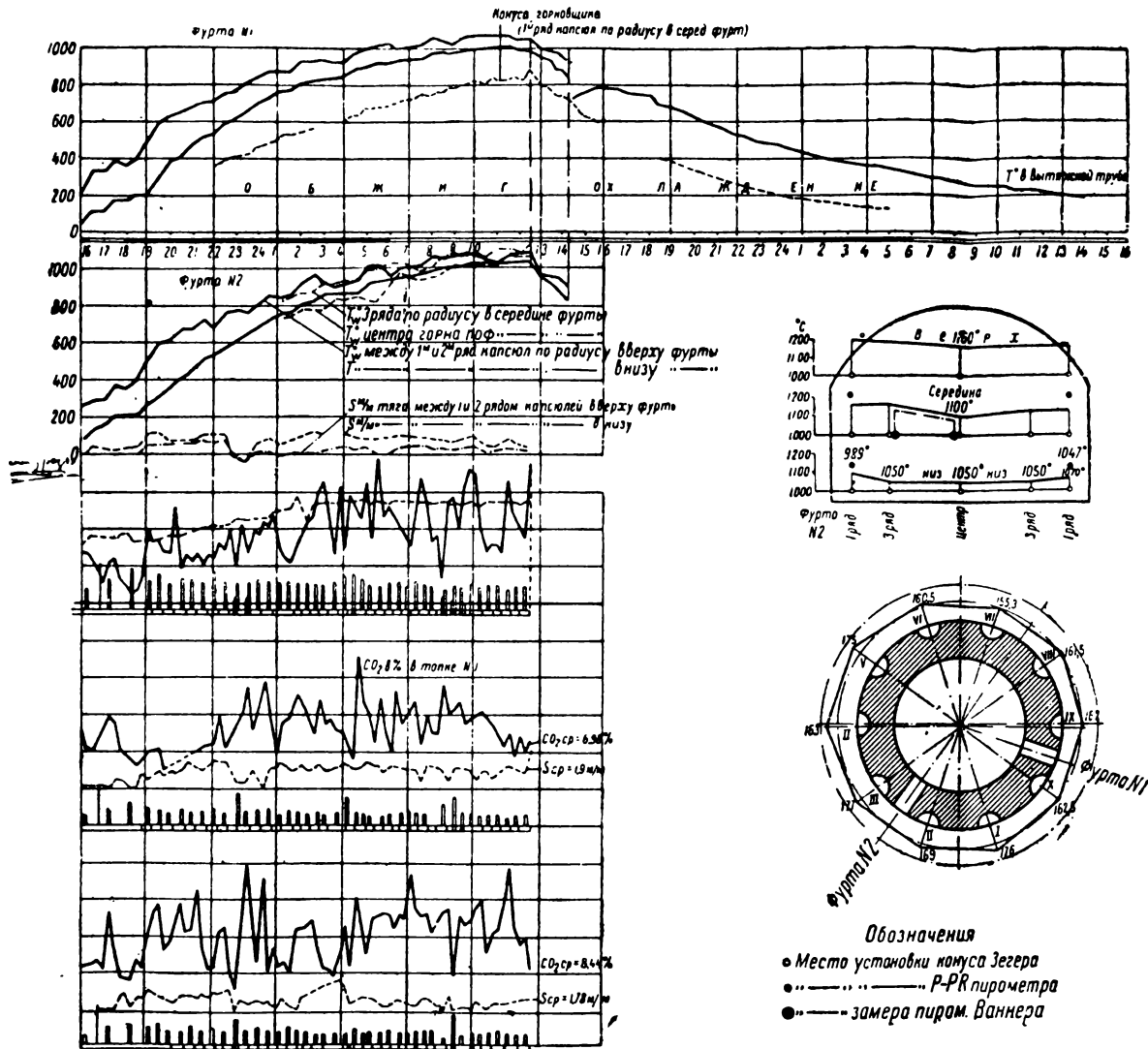


Рис. 93. Кривые температур, газовой среды и давлений при обжиге политого хозфаянса в круглом горне на угле.

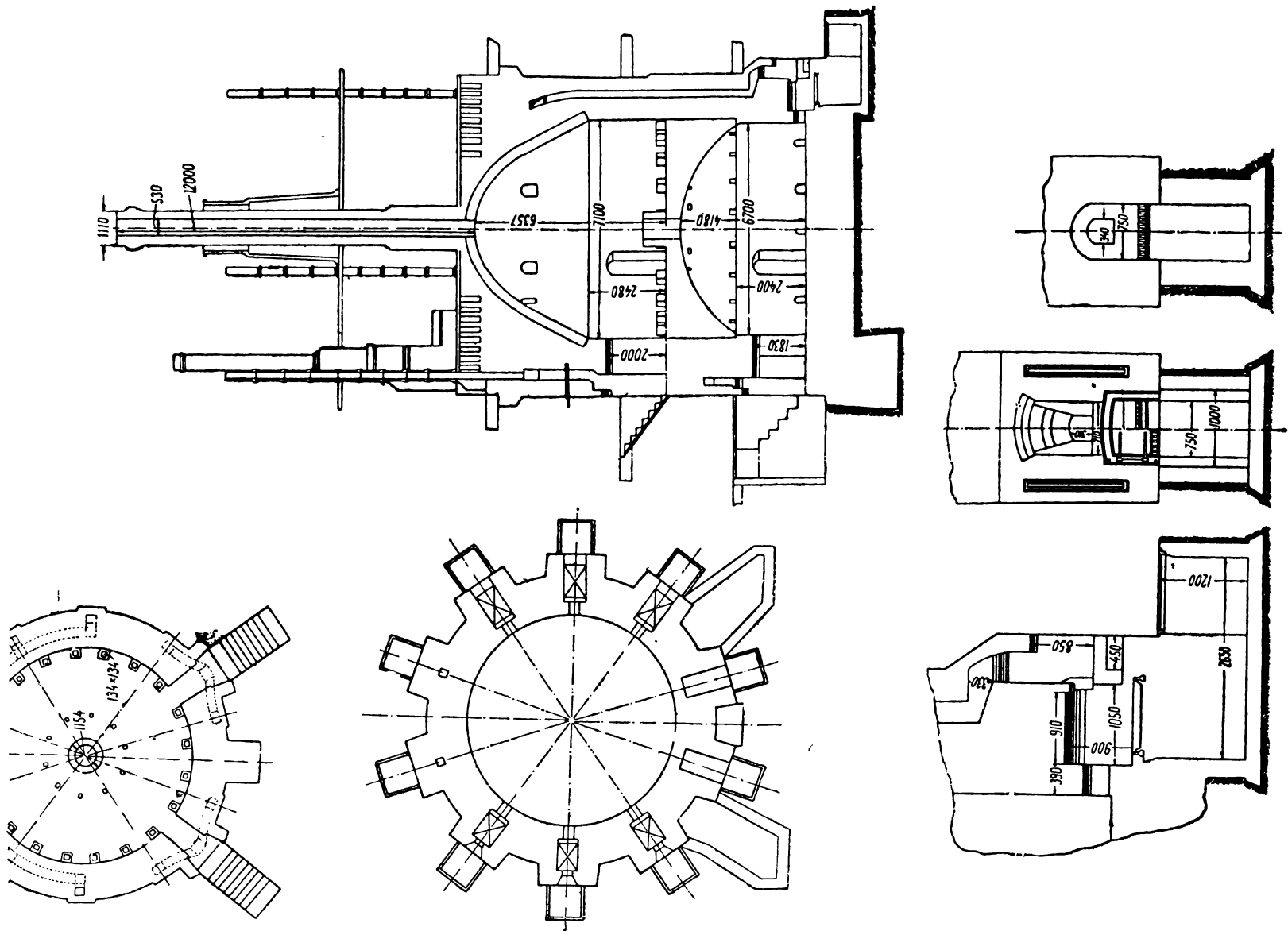
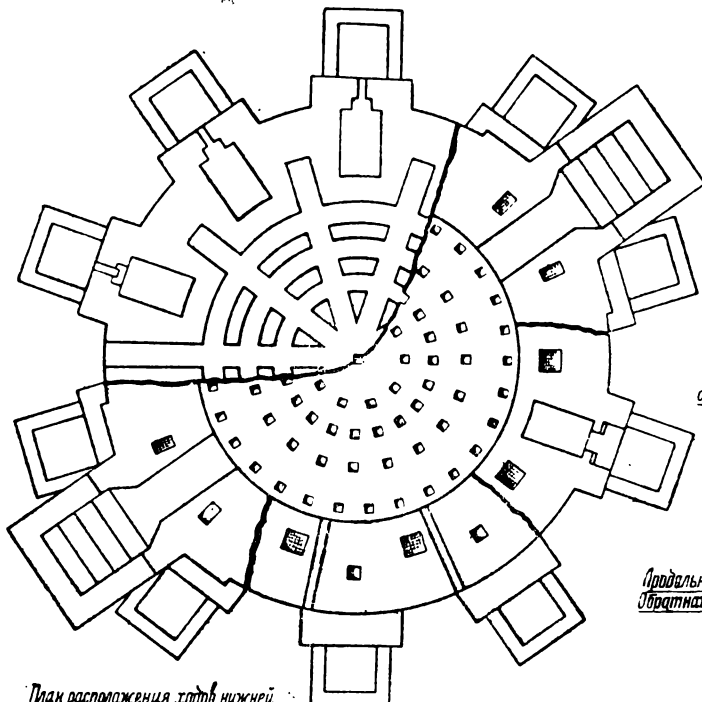
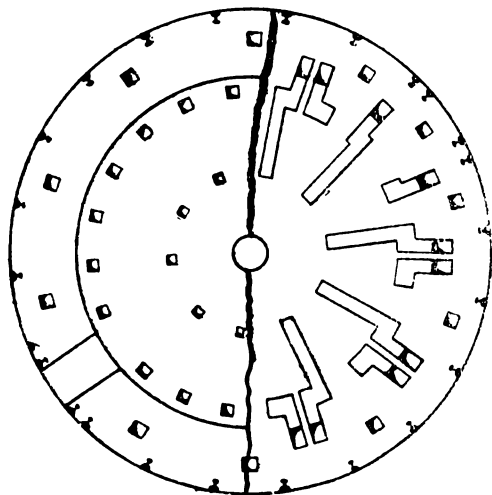


Рис. 94. Двухэтажный фарфоровый горн с восходящим пламенем и с «очелочными» топками.

*План-расположение топков и  
нижних подовых ходов*

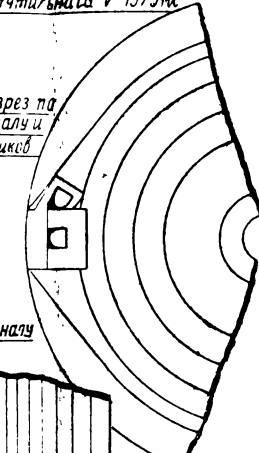


*План расположения ходов нижней  
кореты*

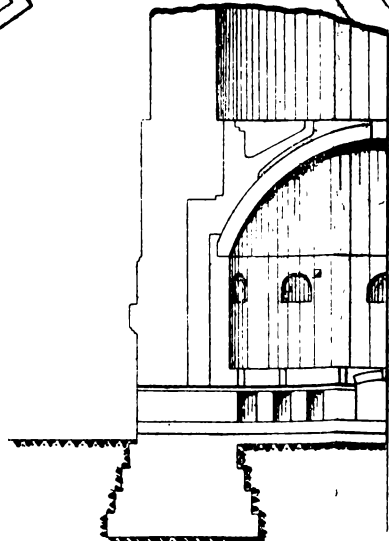


*Объем топкового V-116.1 м<sup>3</sup>  
Объем чистильного V-1975 м<sup>3</sup>*

*Поперечный разрез по  
вытяжному каналу и  
сборнику стравливающих*



*Продольный разрез по каналу  
обратного хода*



*Пол чердачного  
помещения*

*Пол II<sup>го</sup> этажа*

*Пол I<sup>го</sup> этажа*

*Пол подвала*

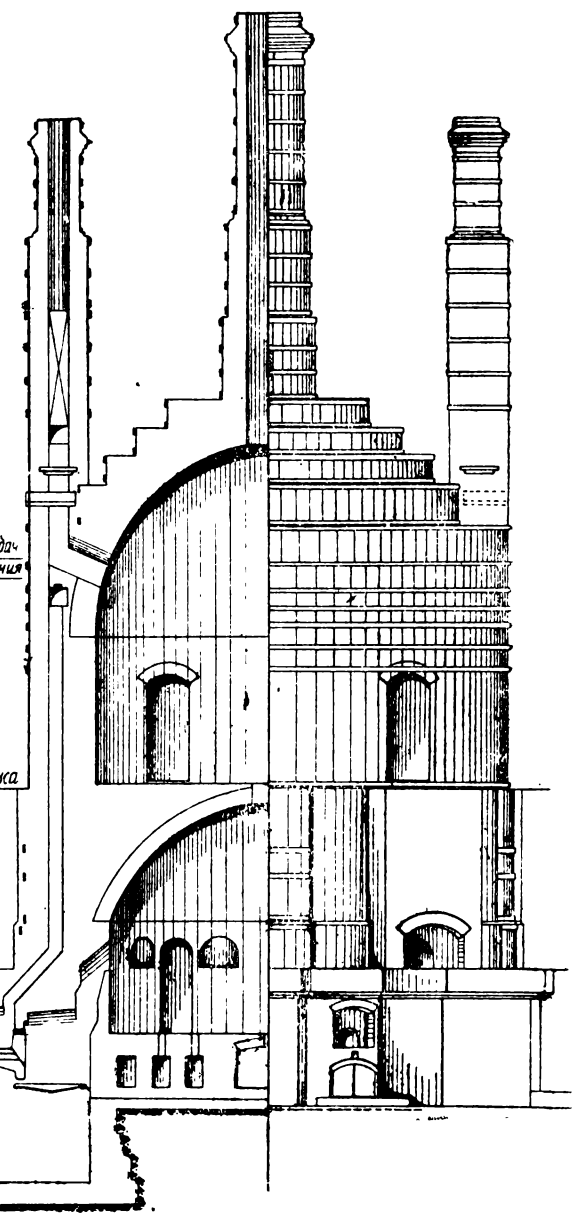


Рис. 96. Двухэтажный фарфоровый горн с обратным пламенем.

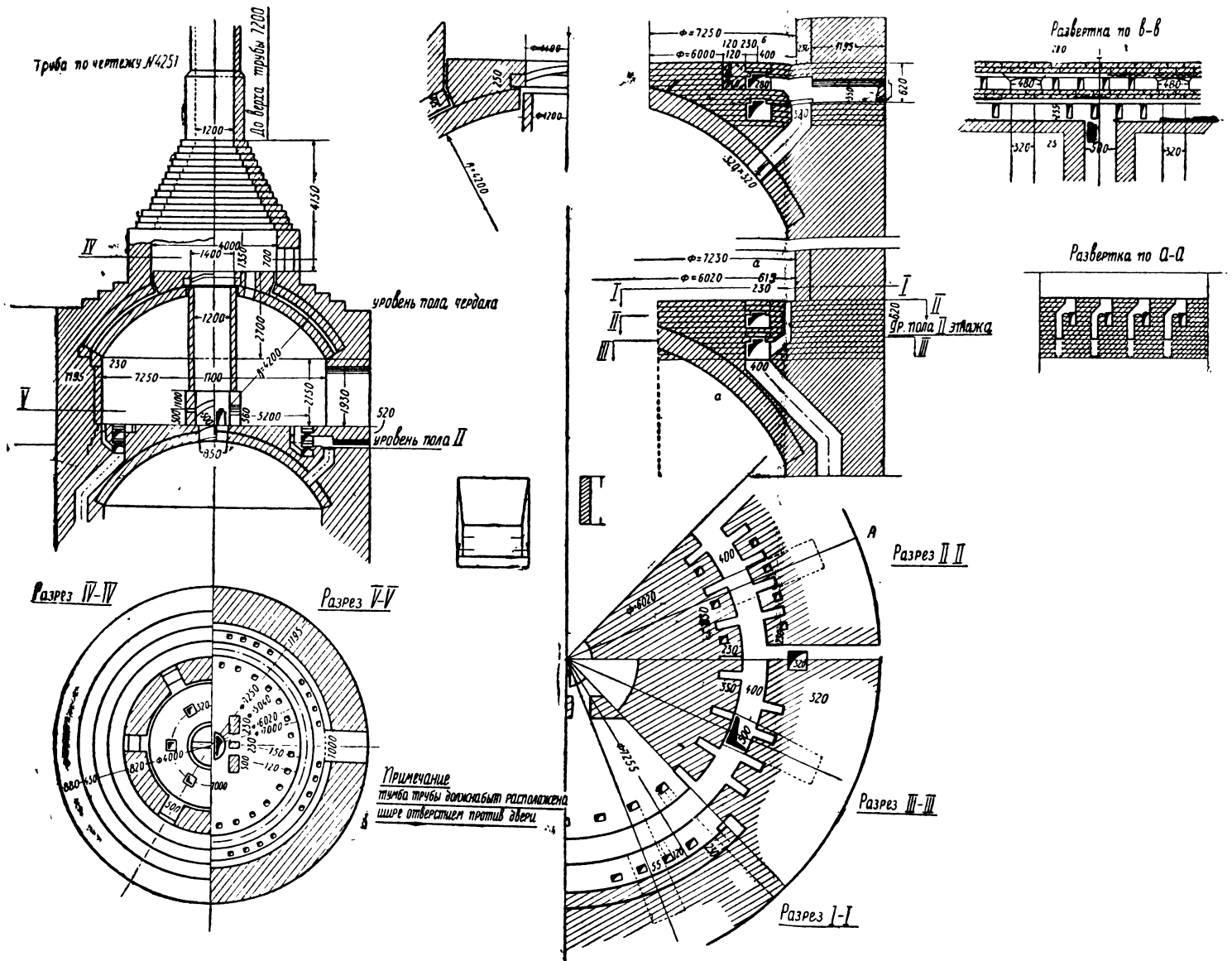


Рис. 101. Детали конструкции горна с обжимом политого фарфора во втором этаже.

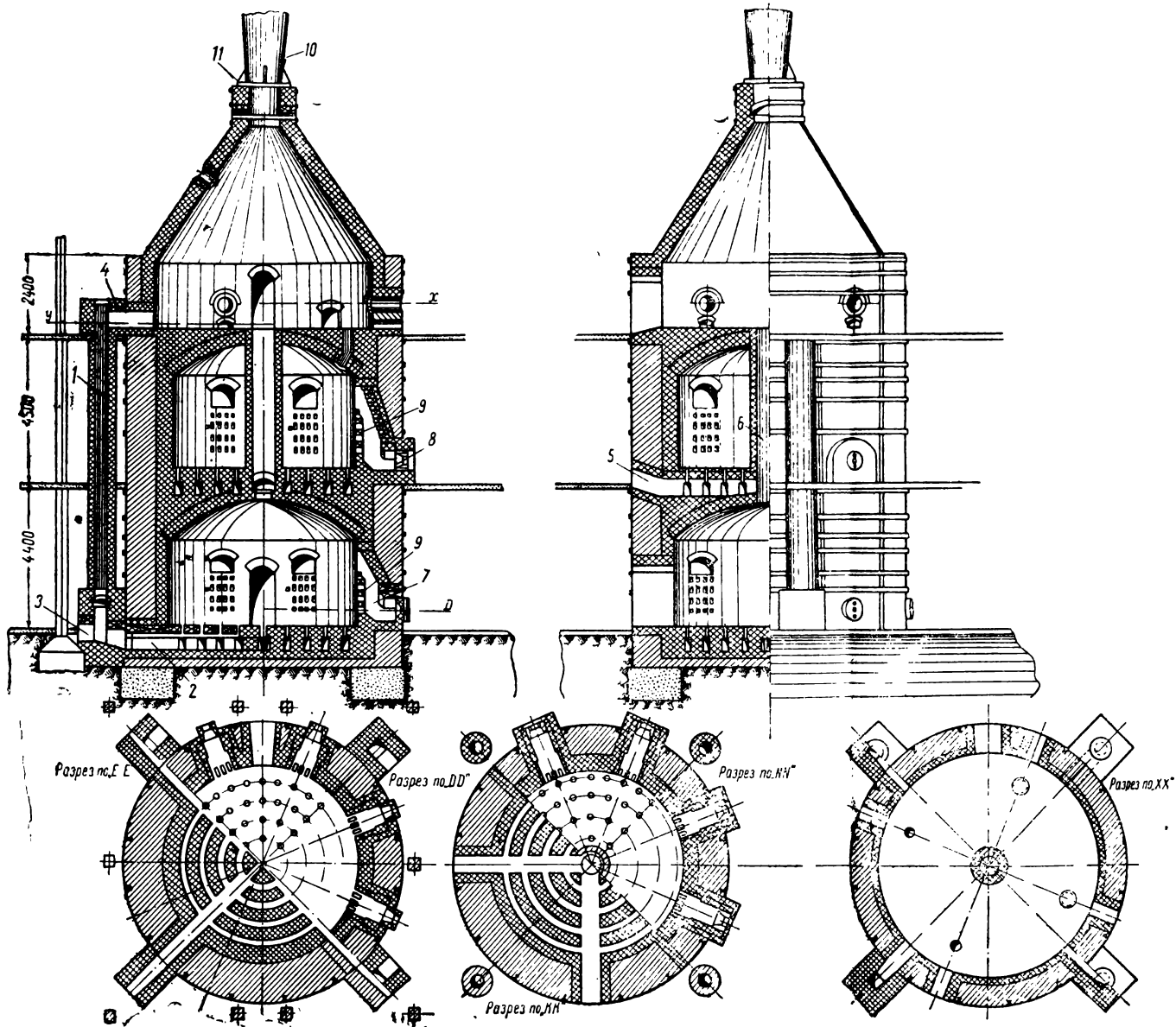


Рис. 104. Двухэтажный горн для обжига изоляторов с мазутными топками и выносными вертикальными каналами.

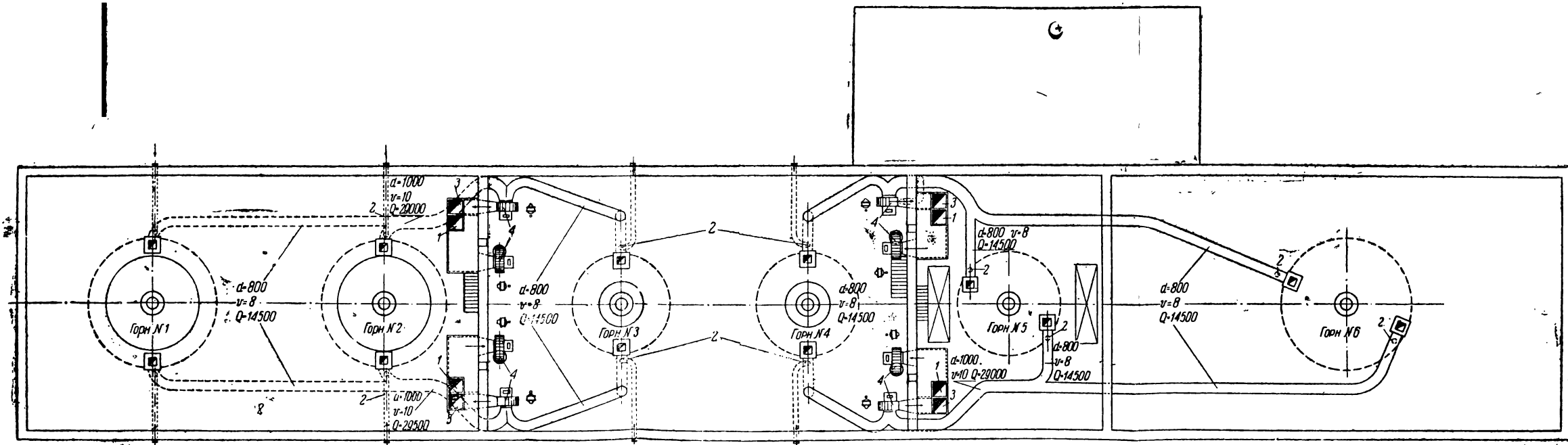


Рис. 106. Искусственная вентиляция для охлаждения круглых горнов (план установок).



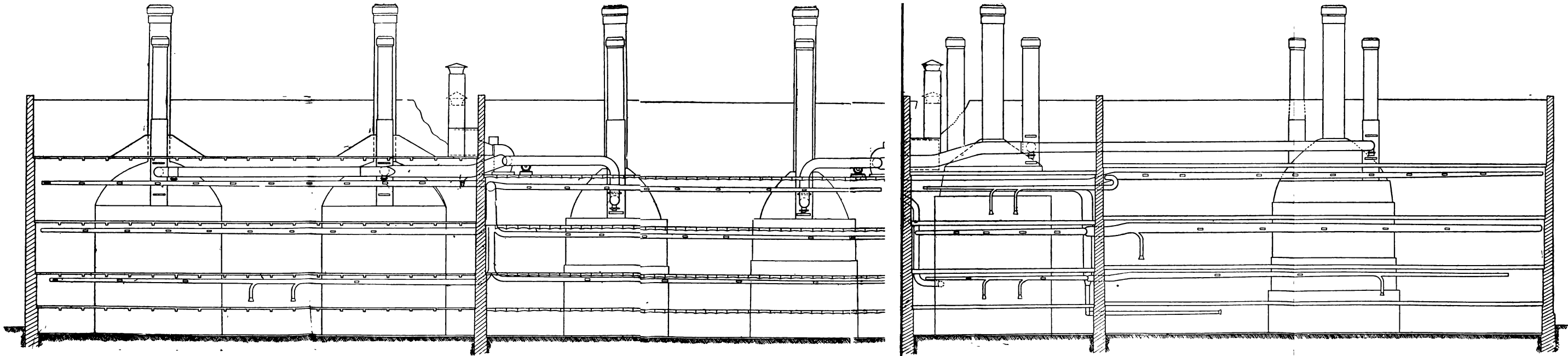


Рис. 107. Вытяжная нагнетательная вентиляция горнов (разрез по т

тажам).

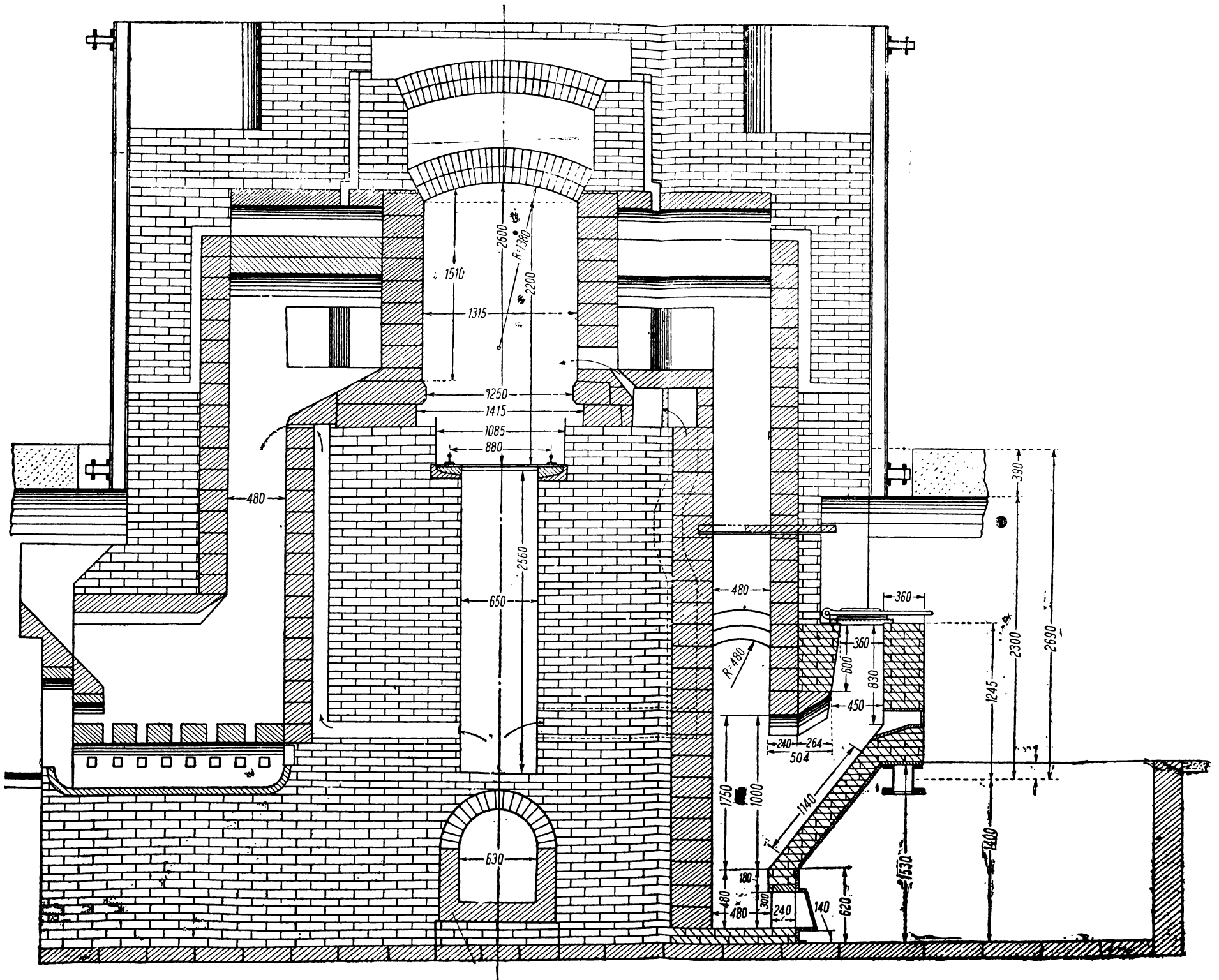


Рис. 133. Топочные зоны туннелей Фужерона с простыми (слева) и полугазовыми (справа) топками (совмещенный разрез двух печей).

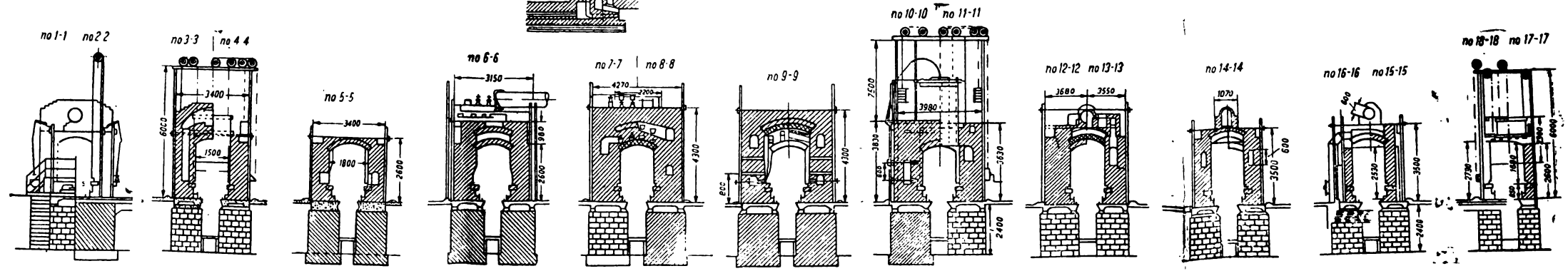
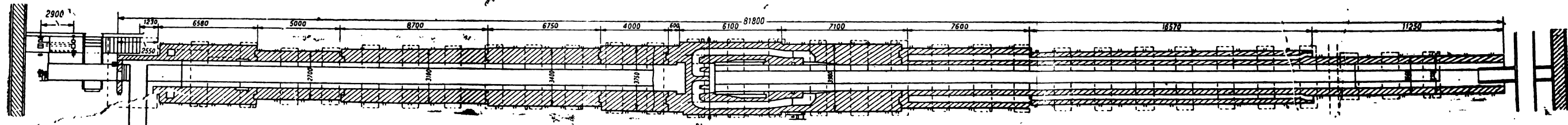
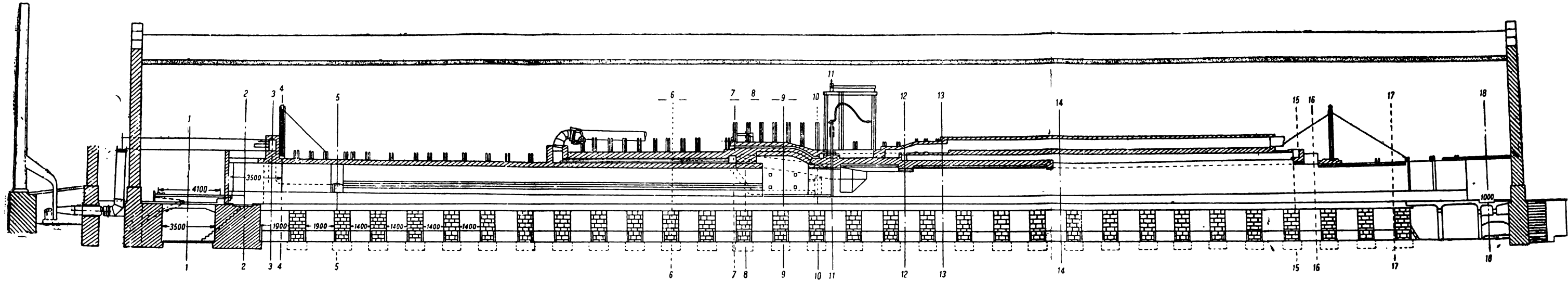


Fig. 100. Furnace No. 2 (cross-sections).

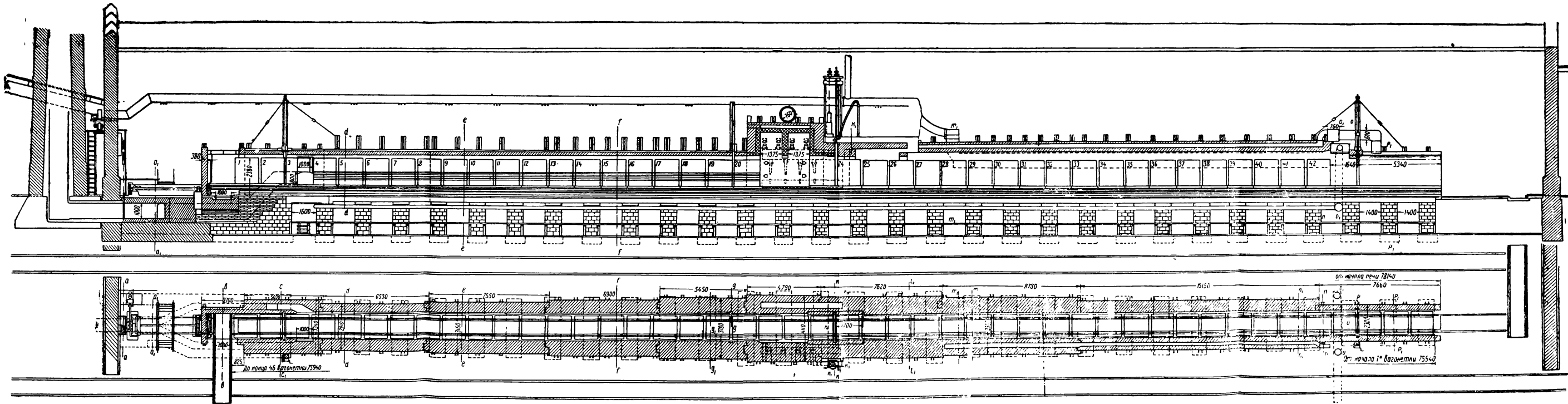


Рис. 140. Туннельная печь № 1 (системы Емельянова).

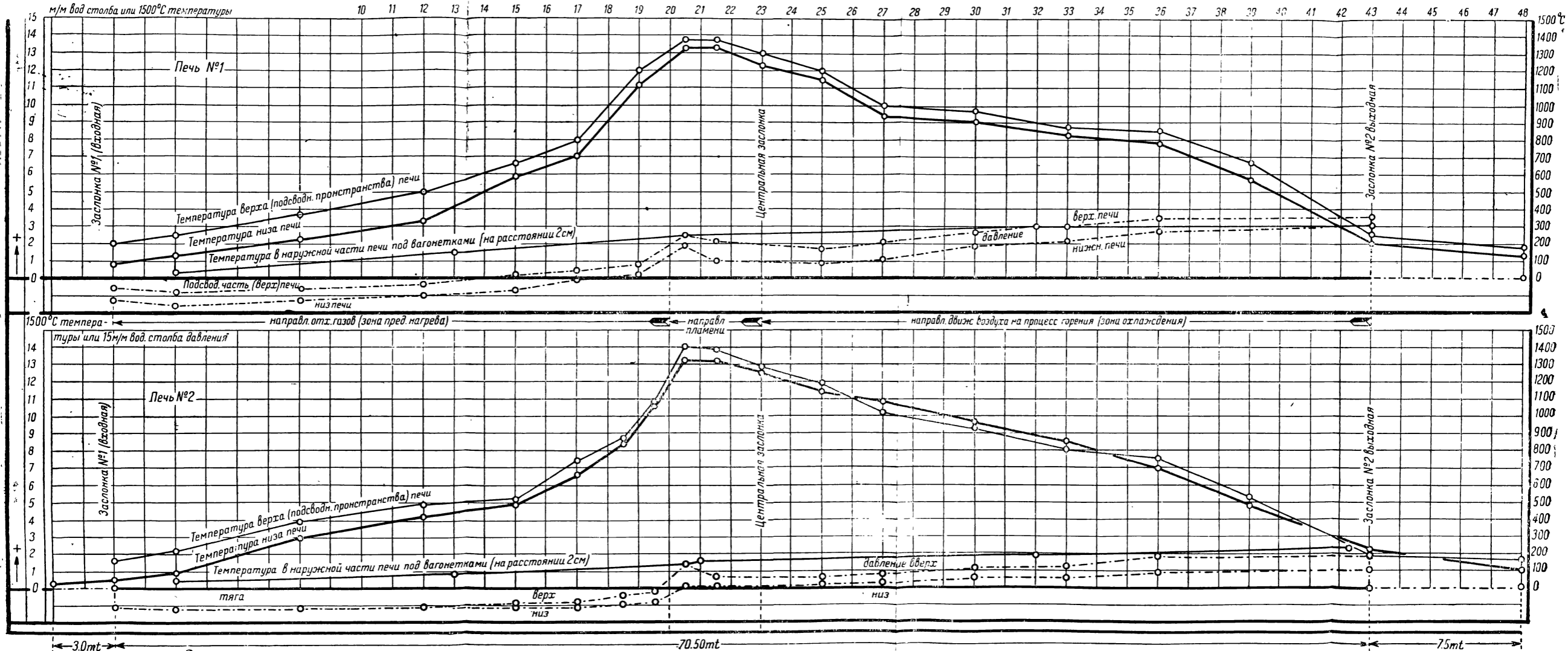


Рис. 143. Кривые обжига в туннельных печах системы Емельянова.

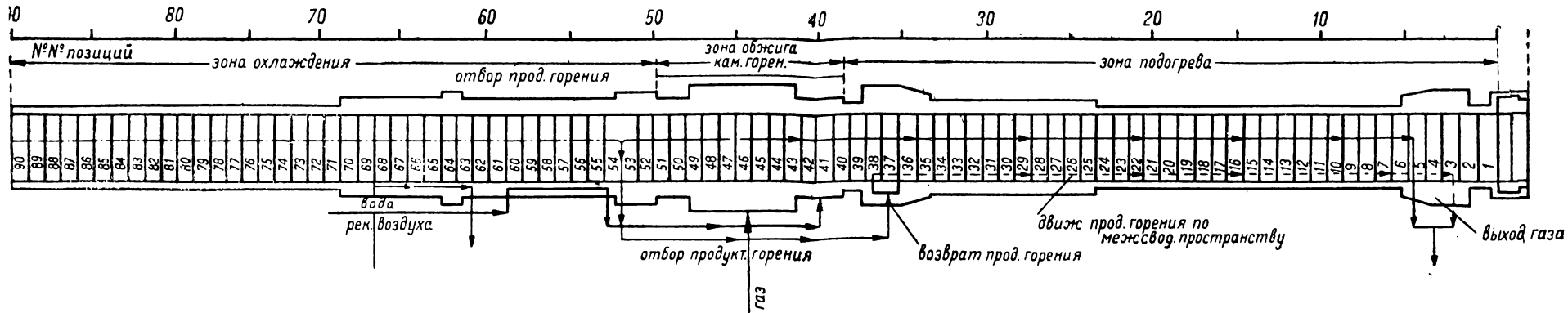
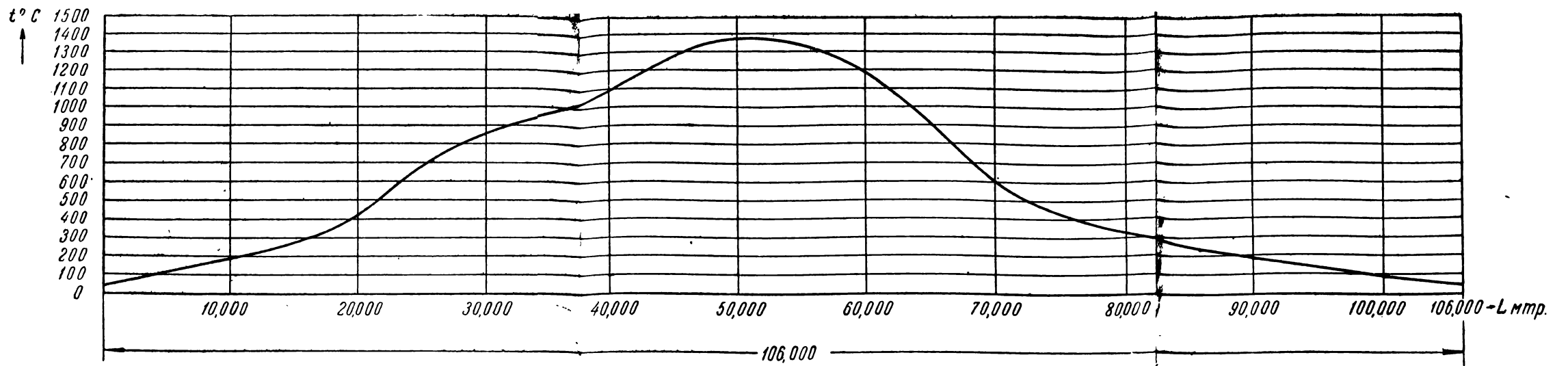
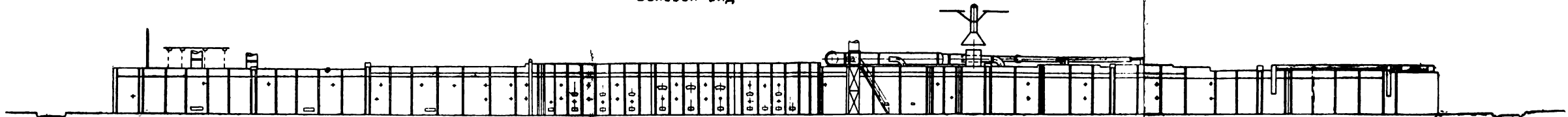


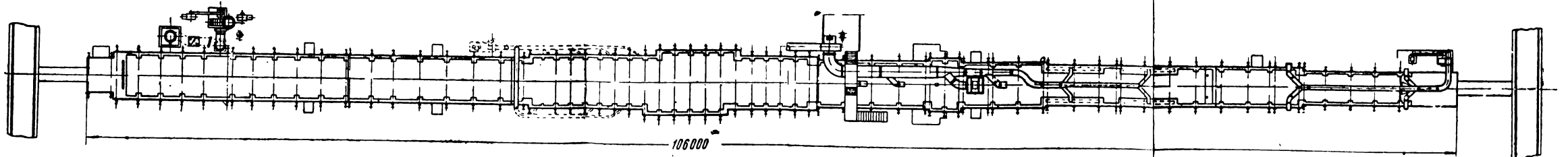
Рис. 145. Схема газового потока в туннельной печи Хирта.



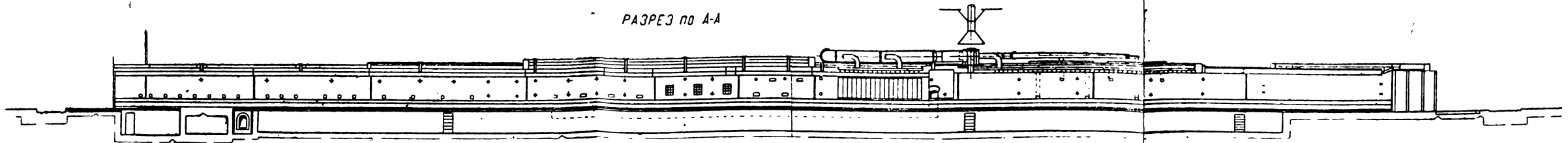
БОКОВОЙ ВИД



ПЛАН



РАЗРЕЗ ПО А-А



РАЗРЕЗ В ПЛАНЕ

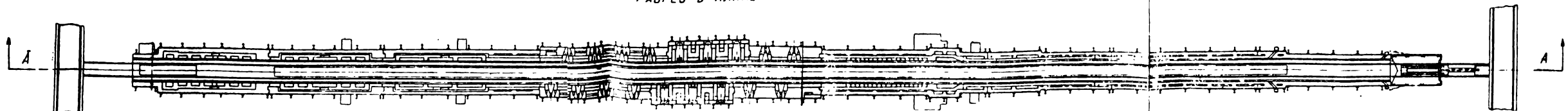
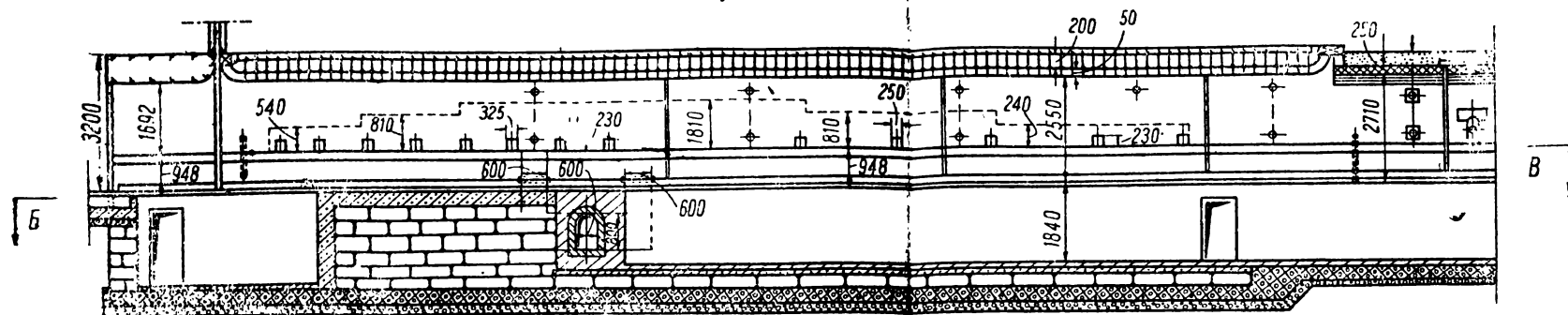


Рис. 173. Туннельная печь для обжига фарфоровой посуды.

Разрез по А-А



Разрез по Б-Б

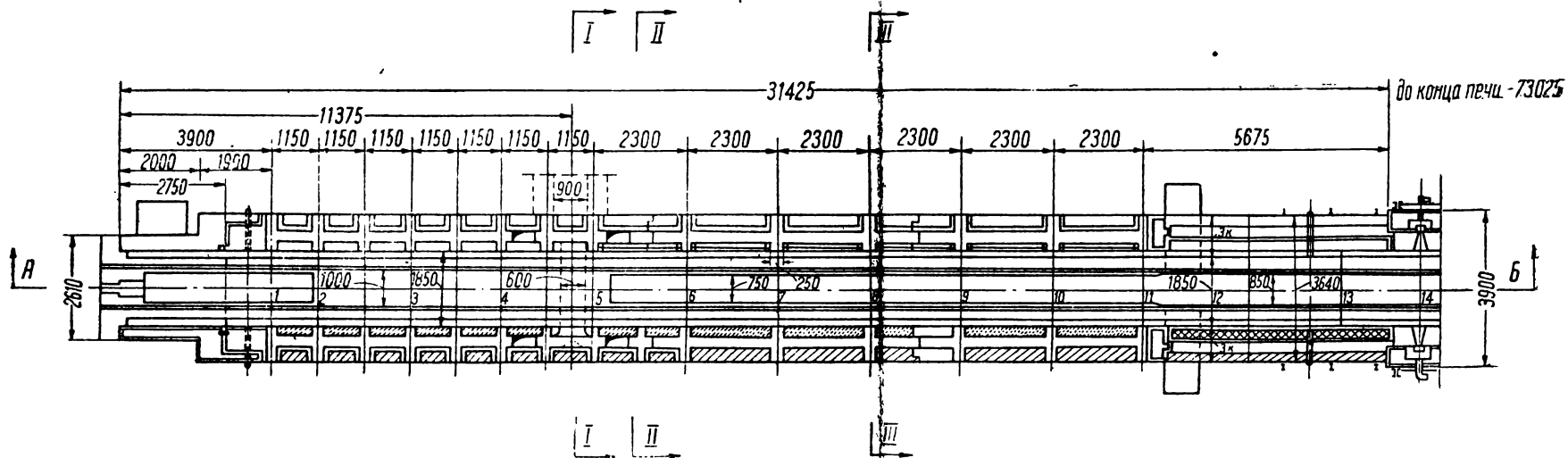
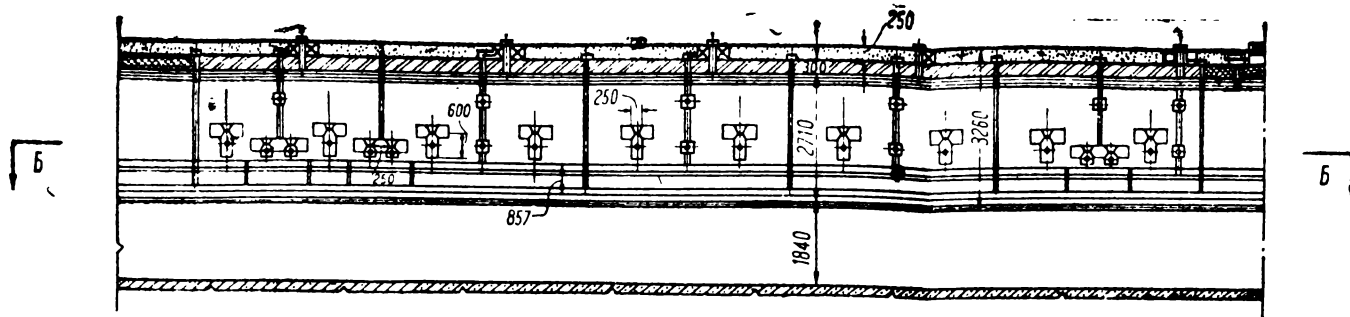








Рис. 176. Зона подогрева с подвесным сводом.





**Условные обозначения**

-  Динас
-  Шамот кл. "Б"
-  Шамот "легковесн. марки"
-  Красн. кирпич "эфект. марки"
-  Инфузорн. земля
-  Шамот кл. "В"

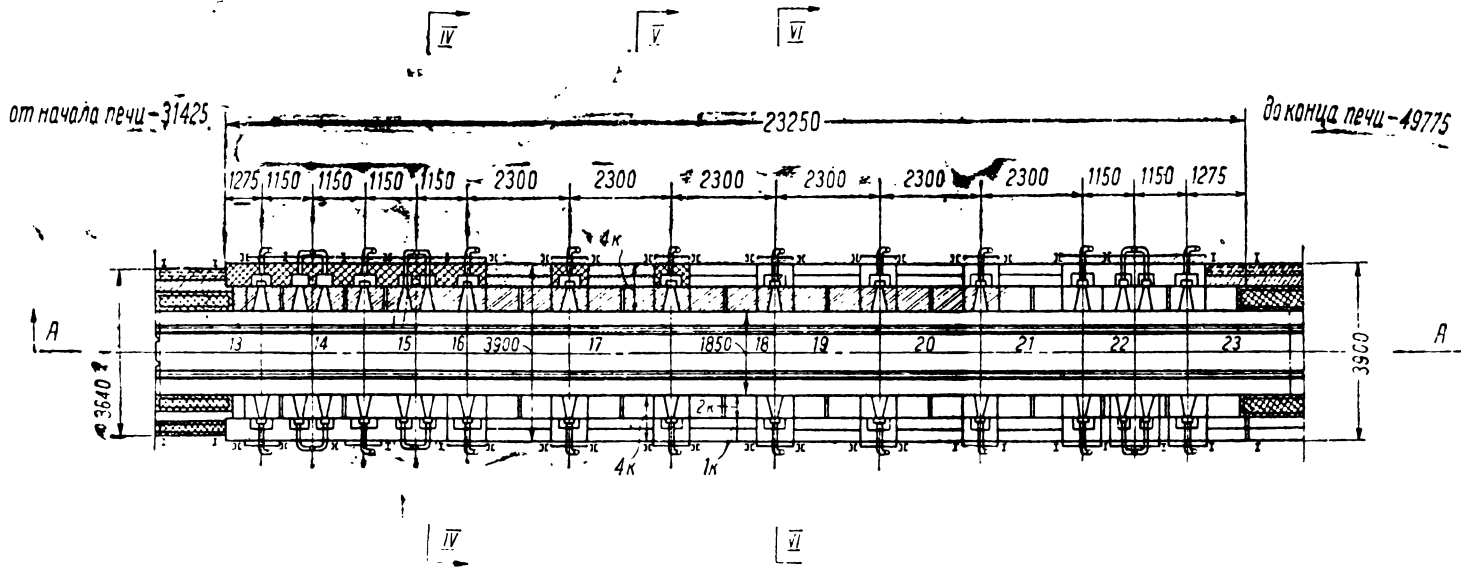


Рис. 178. Зона обжига (план и продольный разрез).

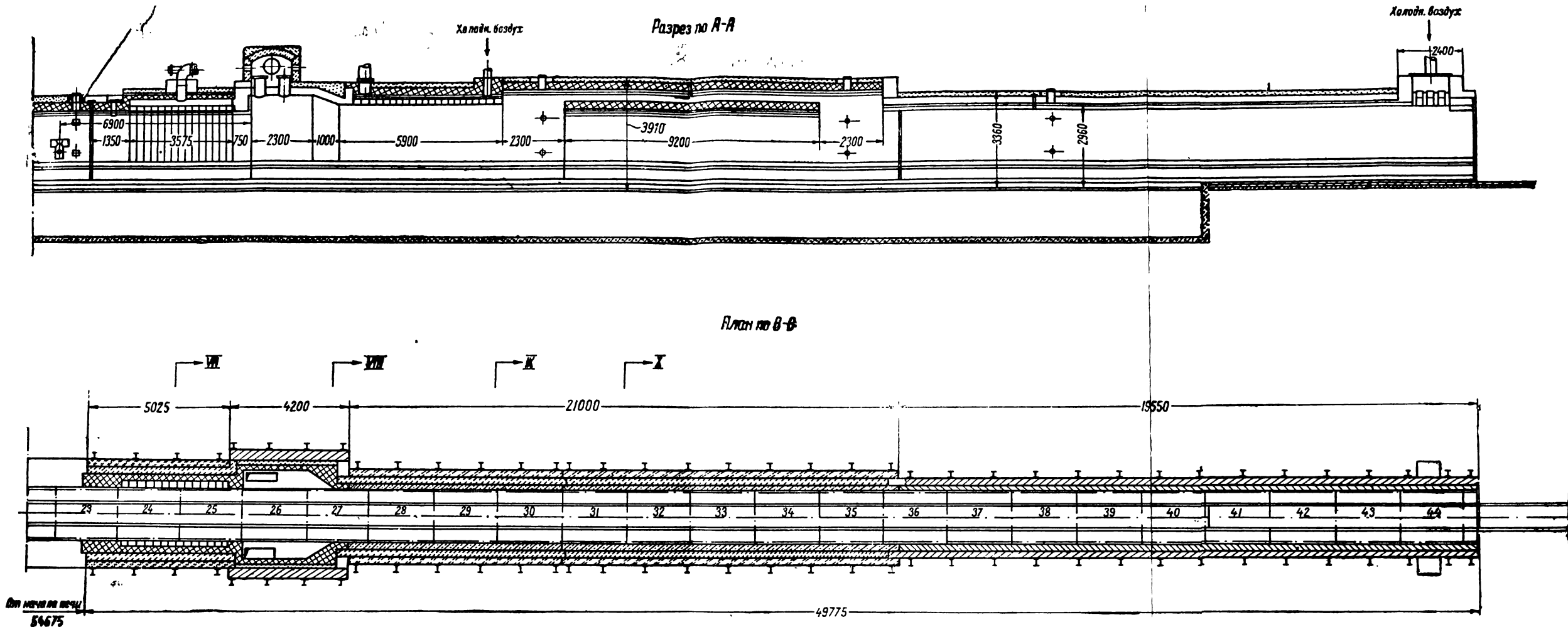


Рис. 180. Зона охлаждения (план и продольный разрез).

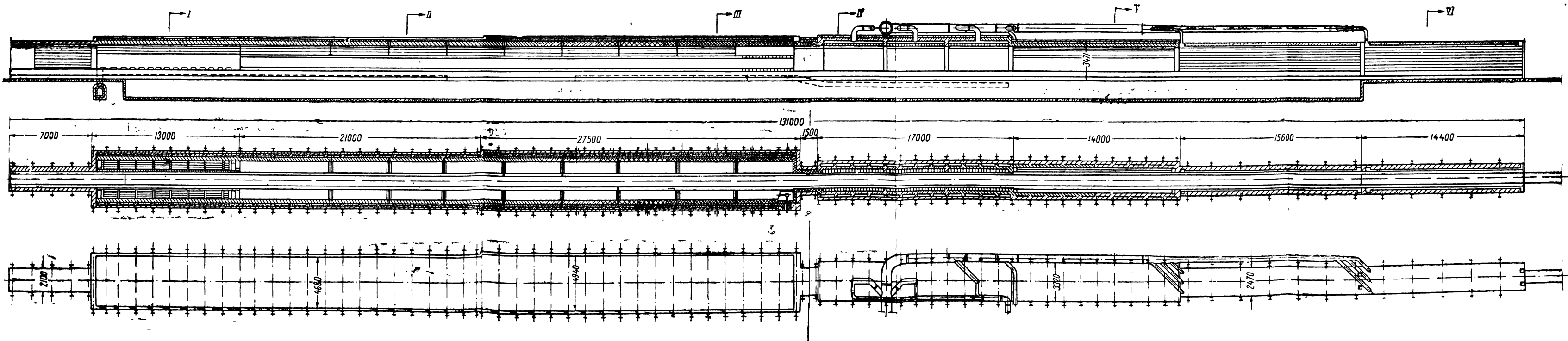


Рис. 182. Муфельная туннельная печь Дресслера (план и продольный разрез).

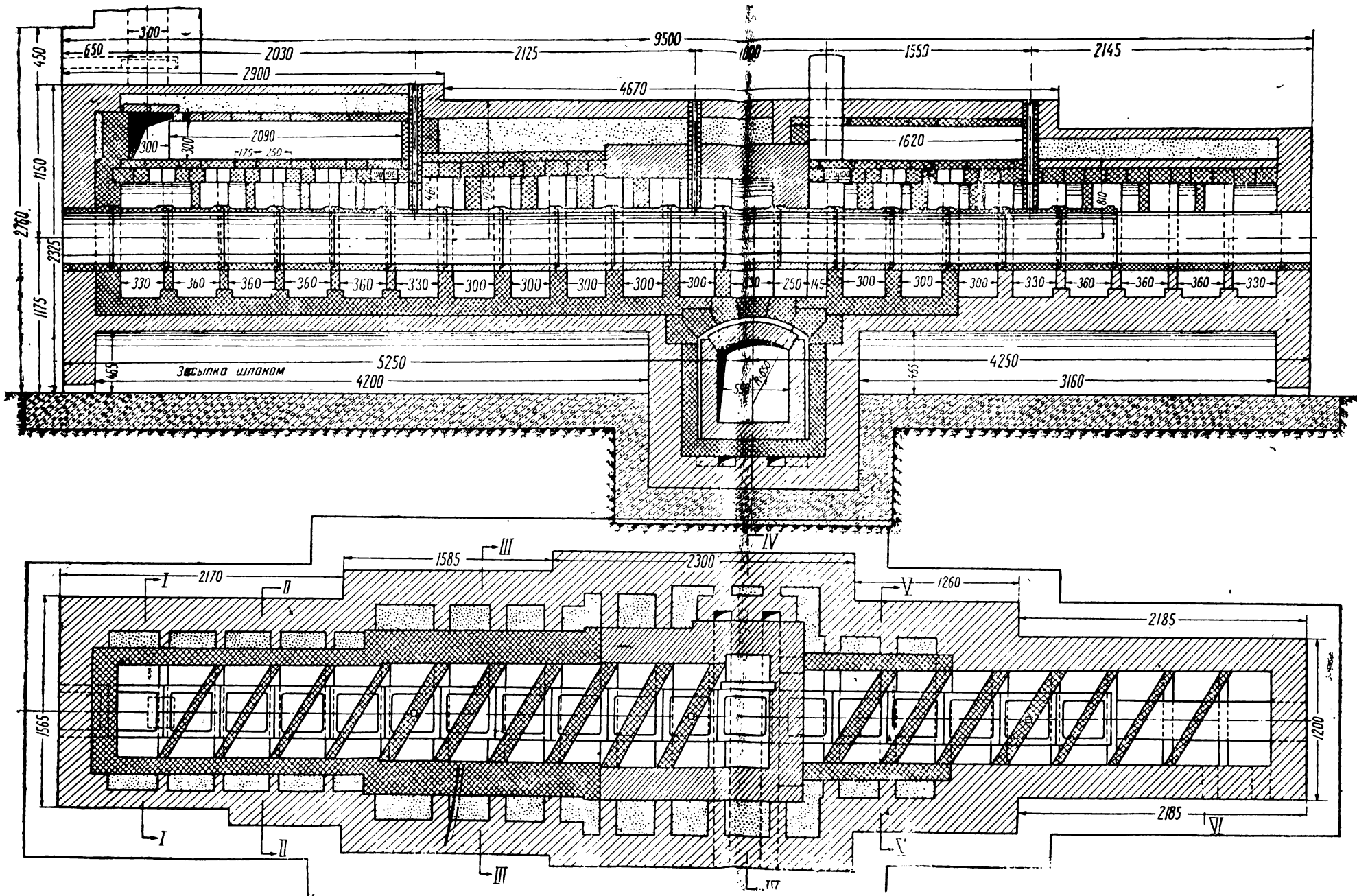


Рис. 193. Короткая муфельная туннельная печь системы Попова (план и продольный разрез).

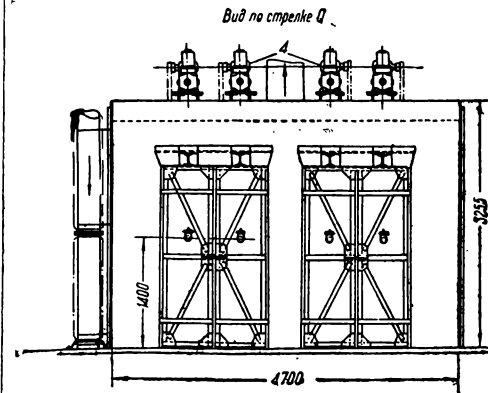
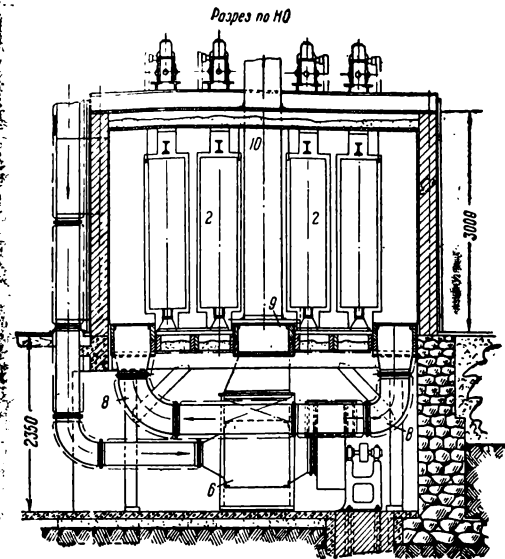
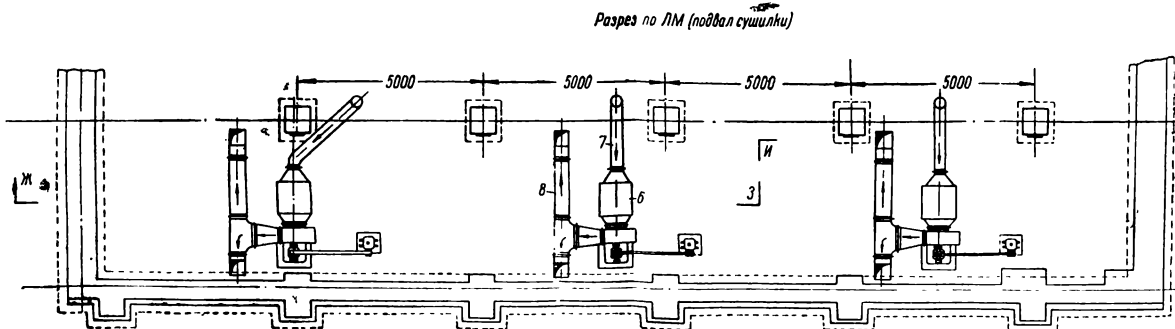
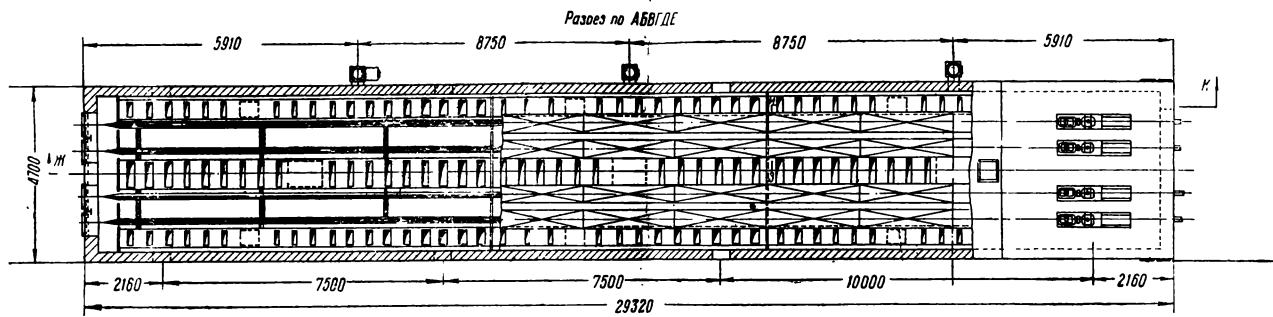
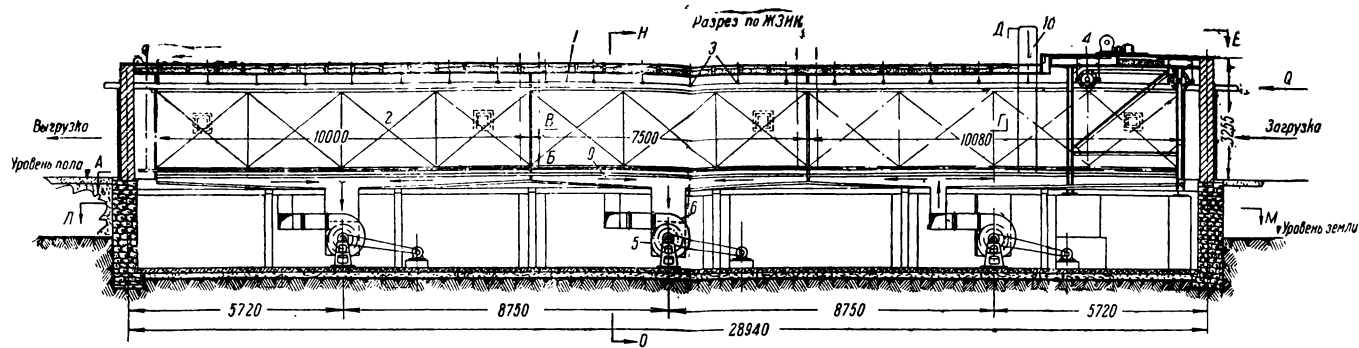


Рис. 222. Туннельная сушилка для капсул.

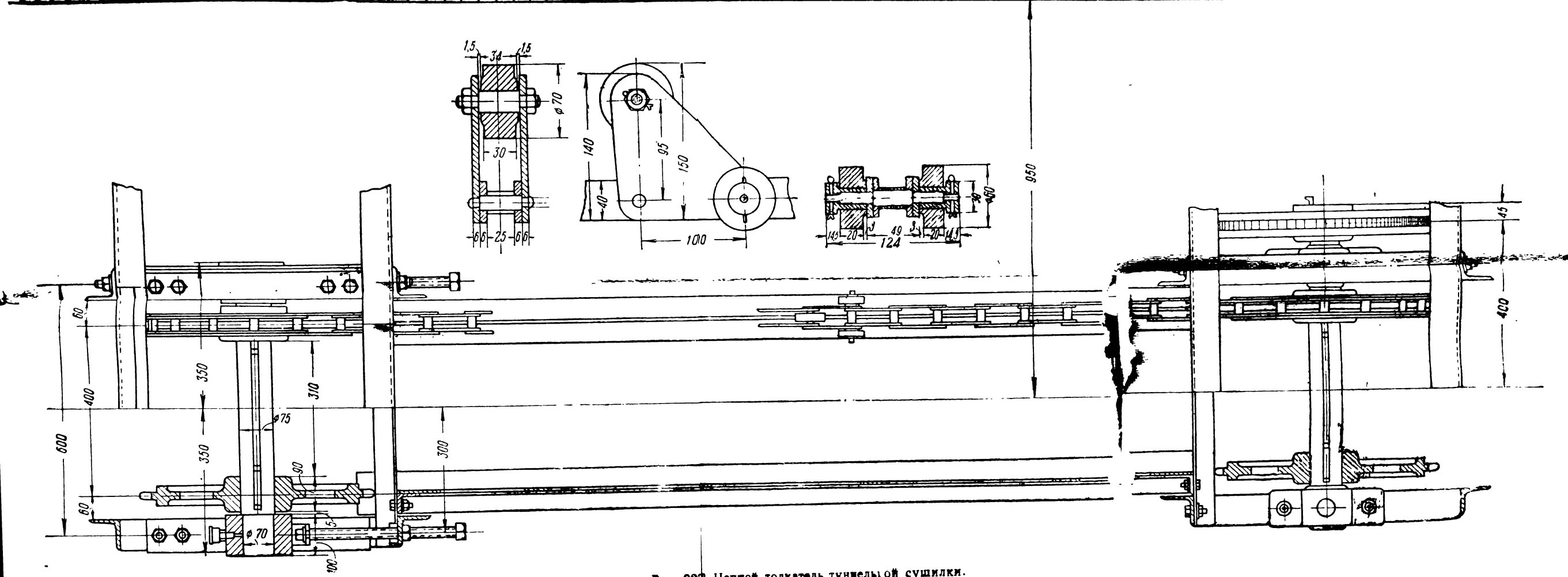
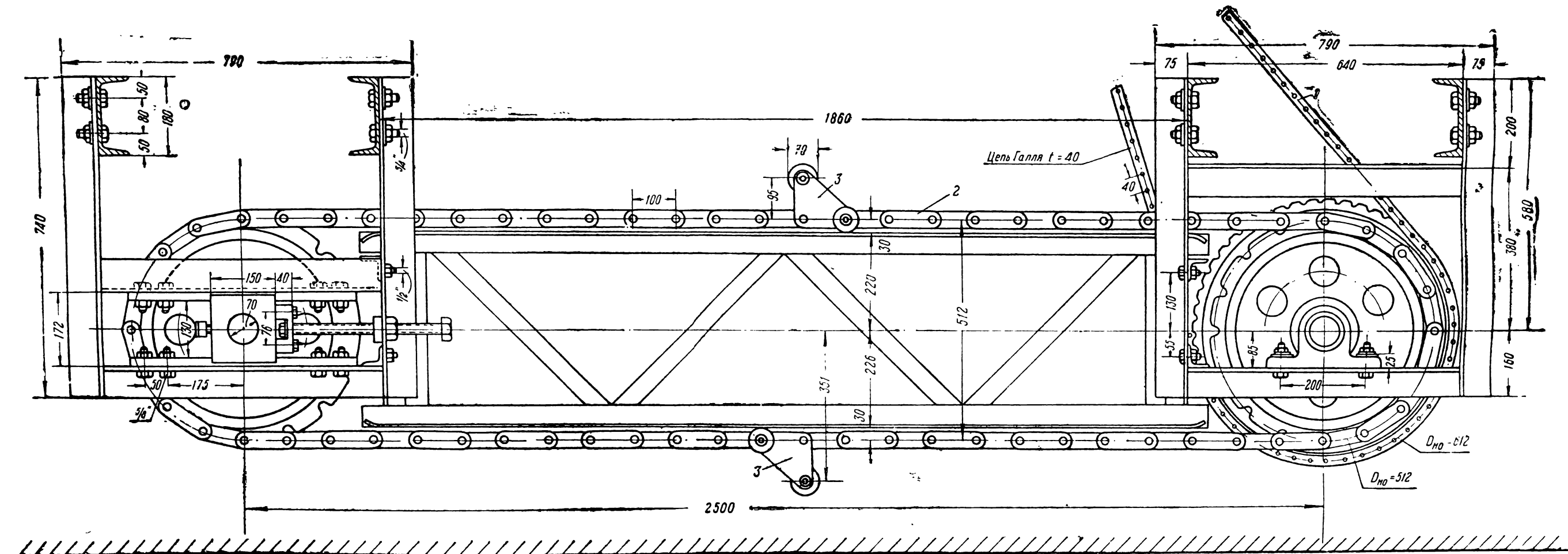


Рис. 224 Цепной толкатель туннельной сушилки.

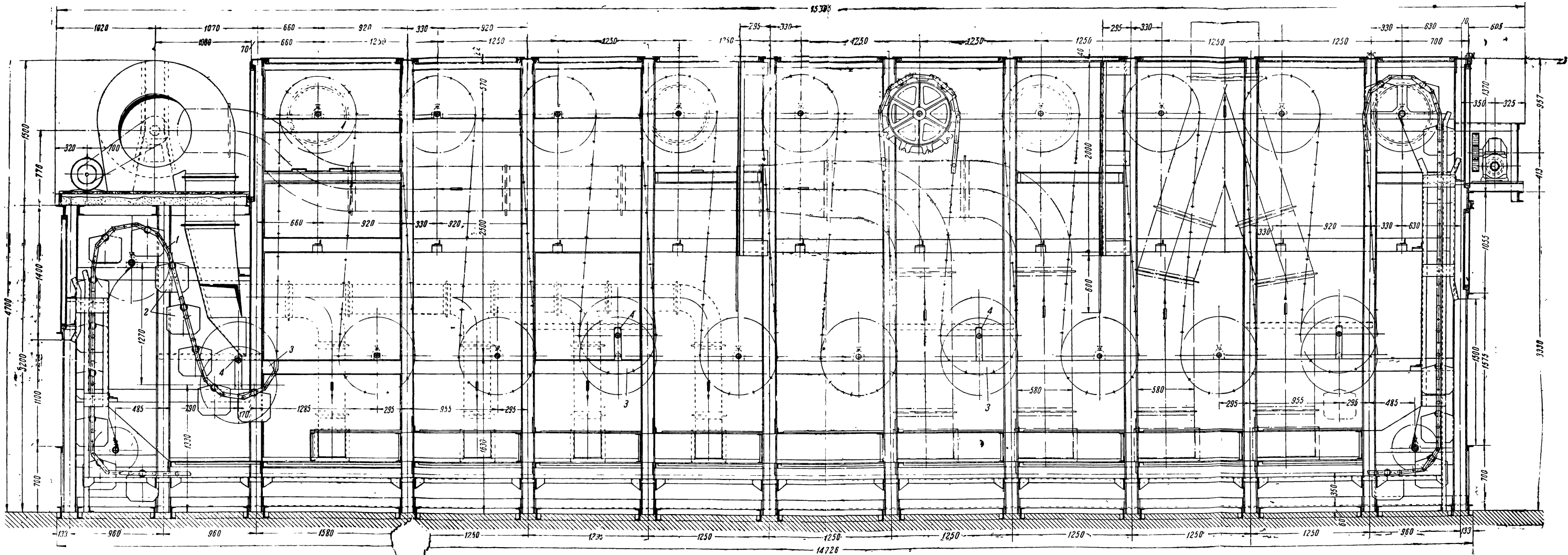
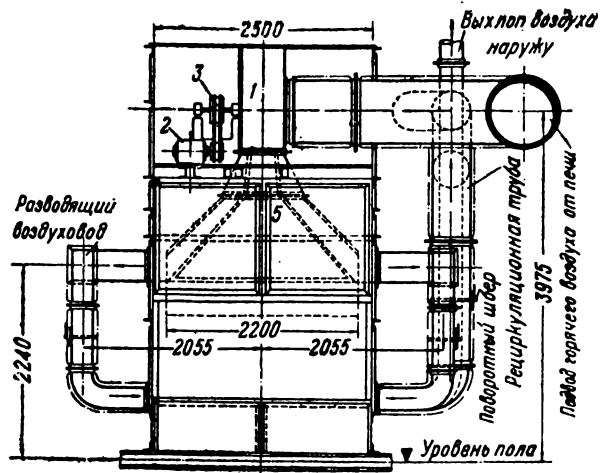


Рис. 229. Конвейерная сушилка для хоз-фарфора.



Трубы подвесить к перекрытию цеха по месту

Выхлоп воздуха наружу

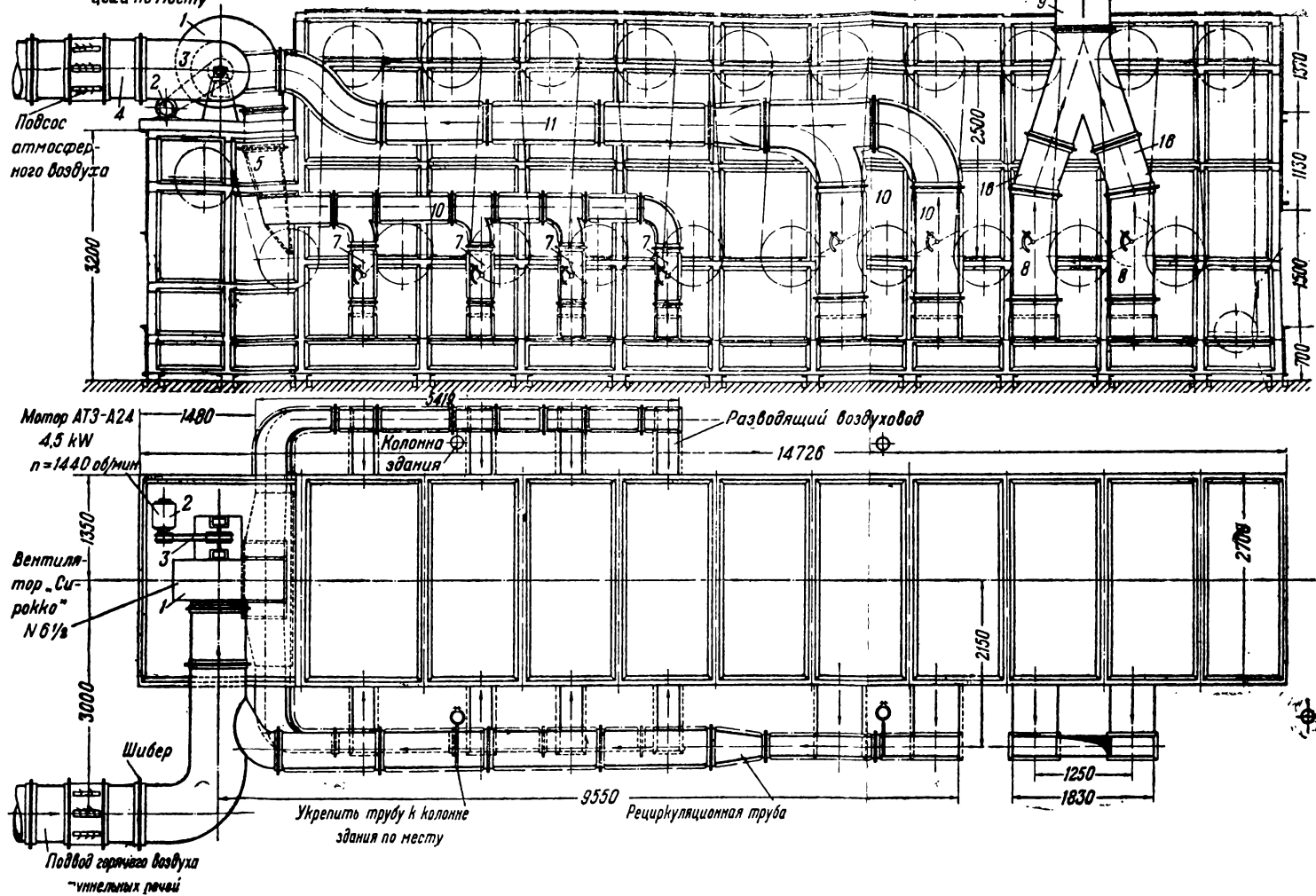


Рис. 231. Конвейерная сушилка для фарфоровой посуды.



50.50  
2005

И. А. БУЛАВИН