

Проф. В. Е. ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО

ПЛАМЕННЫЕ ПЕЧИ

С приложением статьи проф. И. Г. ЕСЬМАНА
„К теории движения газов в металлургических печах“

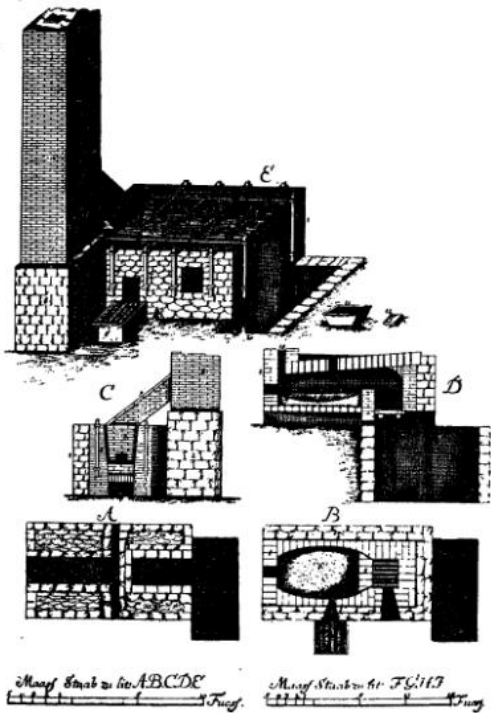
ИЗДАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
имени профессоров В. И. Гриневецкого и К. В. Кирша
МОСКВА — 1925

ЧАСТЬ II.

Гидравлическая теория движения пламени в печах.

Законы движения печных газов.

Первая пламенная отражательная печь с дымовой трубой, так называемая *Curolo*, была изобретена в Англии, в Уэльсе, для плавки свинцовых руд на каменном угле в 1698 году. Печь эта изображена на фиг. 1¹⁾.

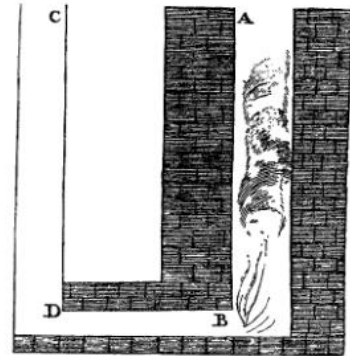


Фиг. 1.

Теория тяги дымовой трубы была дана нашим знаменитым поэтом и ученым Михаилом Васильевичем Ломоносовым, в его диссертации на латинском и русском языках (1742 г.): «О вольном движении воздуха, в рудниках приращенной». На фиг. 2 помещается иллюстрация из его «Первых оснований металлургии» — «действие огня в самодуях». Ломоносов видел причину движения воздуха в рудниках и в самодуях в нарушении равновесия в сообщающихся сосудах *CD* и *AB*, наполненных жидкостями разных удельных весов: *CD* — тяжелый холодный воздух, *AB* — теплый, легкий дым. Столб тяжелого воздуха

«опустясь, выгонит» соответствующий объем легкого, теплого дыма.

Замечательно, что слово «тяга» ни разу не было употреблено Ломоносовым; очевидно, это слово тогда не употреблялось. Ложность, с механической точки зрения, общераспространенного представления, что «дымовая труба тянет», «пламенные печи работают тягой дымовой трубы», надолго задержала развитие теории и расчета пламенных печей. Что слово «тяга» неприложимо



Фиг. 2.

к явлению движения пламени в печах и дымовых трубах, ясно из сопоставления его с другими случаями употребления этого слова: напр., бурлаки тянут барку; паровоз тянет поезд, откуда произошло выражение: служба «тяги». Слово «тяга» подразумевает непосредственную связь между тянущей силой и сопротивлением, газы же могут передать давление, но «тяги» передать не могут, ибо частицы их взаимно отталкиваются. Благодаря введению в употребление такого ложного, с механической стороны, представления, как «тяга дымовой трубы», вопрос о теории работы печей затемнился на целых полтора столетия.

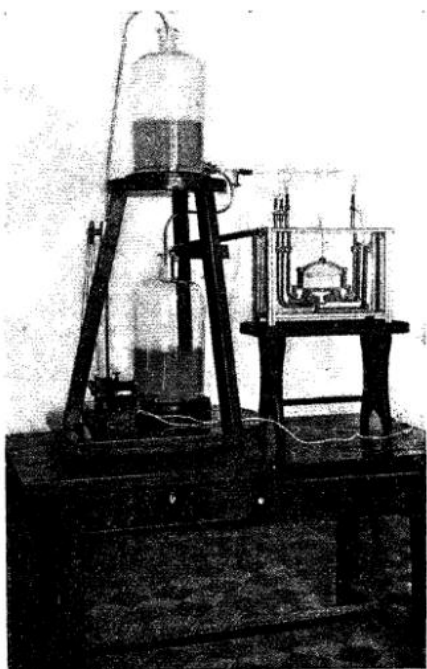
Теория работы печей делается совершенно ясной, расчет их делается простым и доступным, если мы усвоим себе нижеследующую точку зрения; мы сами и все предметы, среди которых мы живем, окружены океаном жидкости, именуемой воздухом; таким образом, наблюдаемые нами пламенные печи плавают в воздухе. Так как жидкость эта в 770 раз

¹⁾ Чертеж взят из металлургии Schlüter'a 1738 года.

легче воды, то мы ее почти не замечаем; мы не считаемся с ней и привыкли думать, что вокруг нас пустота.

В этом-то пренебрежении к роли воздуха и лежит наша ошибка; это и есть причина того, что мы не даем себе ясного отчета в движении пламени в пламенных печах. В тот момент, когда мы учтем наличие воздуха, мы раз'ясним себе механизм движения пламени.

Что такое пламя? Это — смесь раскаленных газов, вступающих между собой в реакцию горения, следствием которого является выделение тепла и накаливание продуктов горения. Твердые частицы пылеобразного углерода, раскаливаясь, дают пламени вид какой-то особой стихии, в действительности же понятие «пламя» может быть совершенно



Фиг. 3.

точно заменено, с механической точки зрения, понятием «поток раскаленных газов».

Итак, в жидкости, именуемой воздухом, 1 м^3 которого весит около 1,29 кг, находится пламенная печь, а в ней движется поток раскаленных газов, т.-е. жидкости, в несколько раз легче, чем воздух.

Припомним, что коэффициент расширения газов равен $\frac{1}{273}$; а потому, если удельный вес воздуха при 0° принять за единицу, то удельный вес воздуха, нагретого до 273° , будет равен половине, при 546° —трети, при 819° —четверти, при 1092° —пятой части, при 1365° —шестой части, при 1638° —седьмой, при 1911° —восьмой части веса воздуха при 0° . А так как вес 1 м^3 воздуха при 0° —

1,29 кг., то вес его

при 273°	0,645	кг
„ 546°	0,430	„
„ 819°	0,322	„
„ 1092°	0,258	„
„ 1365°	0,215	„
„ 1638°	0,184	„
„ 1911°	0,161	„ и т. д.

Реальное представление о разнице между воздухом при 0° и 1638° мы составим себе, если мысленно приравняем воздух при температуре мартеповской печи — воде; тогда холодный воздух придется приравнять жидкому чугуно.

Итак, пламенная печь, работающая на наших глазах, должна быть нами представлена погруженной в аквариум с очень тяжелой жидкостью; в полостях же ее движется очень легкая жидкость и движение пламени в печи есть движение легкой жидкости в тяжелой.

Полное представление о движении пламени в печи мы себе составим, если возьмем модель пламенной печи, опустим ее в аквариум с водой и пустим в полостях ее какую-нибудь легкую жидкость, например керосин. Движение керосина в точности воспроизведет нам движение пламени в печи.

Демонстрация движения пламени, как движения легкой жидкости в тяжелой ¹⁾.

Для примера беру разрез кирпичеобжигательной печи, сделанной из белого металла и помещенной между двумя зеркальными стеклами; по трубкам, проведенным в топку, пускаю струю окрашенного керосина.

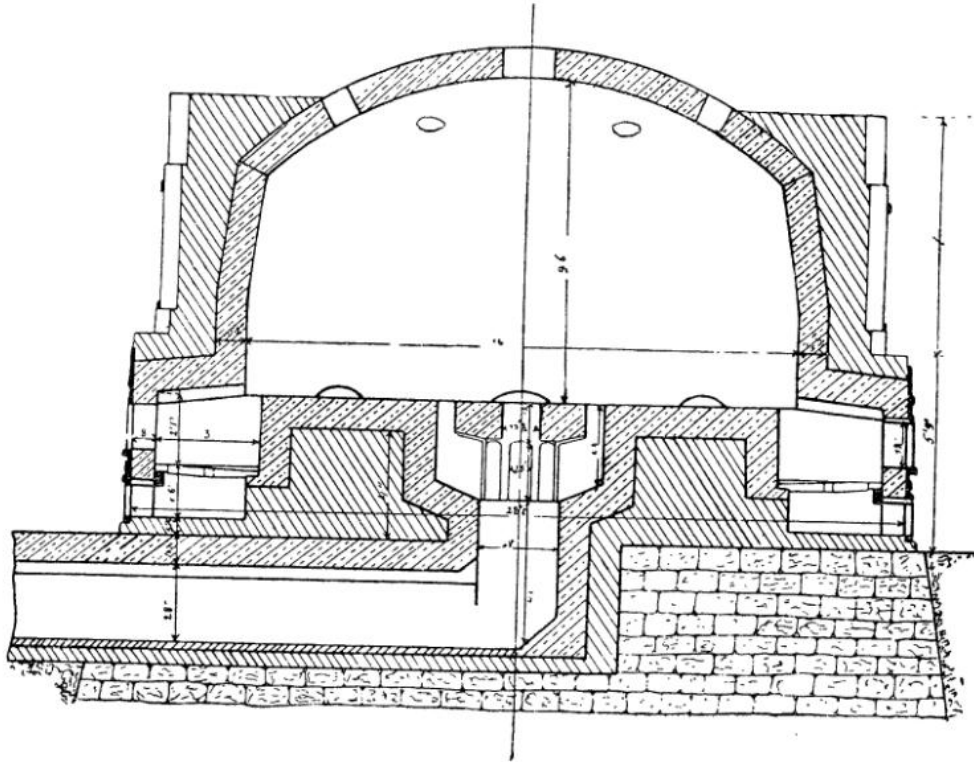
Опыт первый. В замке свода печи открываю отверстие и исследую старый тип кирпичеобжигательной печи с прямой тягой вверх (фиг. 5).

Пускаю в печь немного керосина, отверстие наверху оставляю вполне открытым. Струйка керосина поднимается вверх и полость печи не выполняется керосином. Прибавляю керосина, т.-е. усиливаю топку; результат такой же. Очевидно обжиг кирпича будет неудовлетворительный. Чтобы сделать его возможным, нам придется несколько

¹⁾ На фотографии фиг. 3 показана общая установка для демонстрации движения пламени на моих лекциях в Пол. Инст. Как видно на фотографии, модель кирпичеобжигательной печи Мотовилихинского завода (чертеж этой печи см. фиг. 4) опущена в аквариум с водой. По трубкам с кранами в топку модели пускается керосин из стеклянной бутылки, расположенной выше аквариума. Керосин, пройдя по полостям модели печи, всплывает на поверхность аквариума и по желобу стекает в нижнюю бутылку, оттуда при помощи насоса и мотора в $\frac{1}{40}$ лш. силы перекачивается в верхнюю бутылку. Таким образом устанавливается круговорот керосина и модель демонстрируется сколько угодно времени.

прикрыть дымовое окно наверху. Делаю это (фиг 3). Суживая отверстие, мы заставляем скапливать керосин, он все более и более выполняет полость печи, пока, наконец, не установится равновесие между приходом и расходом и уровень керосина не сделается постоянным.

тягой имели лет двадцать назад всеобщее распространение. Зачастую их можно видеть на фарфоровых заводах (Ленингр. завод б. бр. К о р н и л о в ы х). Недавно еще такая печь работала в Путиловском заводе. Но это — последние могикане. Они заменяются печами «с обратной тягой».



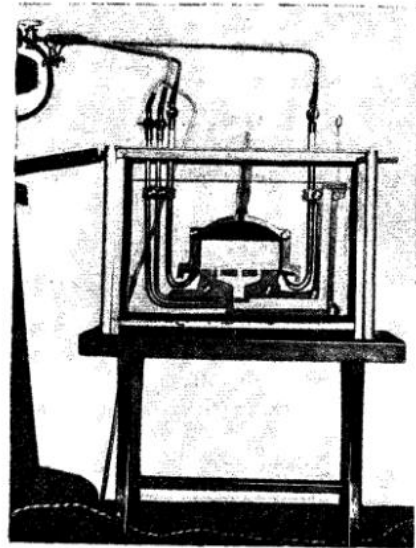
Фиг. 4.

На фиг. 3 видно, что печь выполнена пламенем до половины. Пространство между уровнем керосина и подом печи не выполняется пламенем; это пространство будет прогреваться вихрями, порождаемыми разностью уд. веса пламени и холодных печных газов и только в подкупольном пространстве оно будет сравнительно покойно.

Но так как обжиг кирпича не допускает резкого подъема температуры — кирпич в этом случае выходит весь в трещинах — то обжигать кирпич в управляемой так печи нельзя.

Надо еще с'узить отверстие в замке купола и добиться того, чтобы уровень пламени совместился бы с подом печи. Это — максимум того, чего можно добиться при этой системе кирпичеобжигательных печей с прямой тягой.

Кирпич выйдет удовлетворительным, но, все-таки, неважных качеств, ибо все-таки горячие струйки пламени проберутся в отверстие в замке, выравнивание же температуры печи пойдет исключительно за счет вихревого движения. Энергия этого вихревого движения будет слабее, чем в случае фиг. 3, но все же оно будет существовать, так как температура на поду будет ниже, чем под куполом. Кирпичеобжигательные печи с прямой

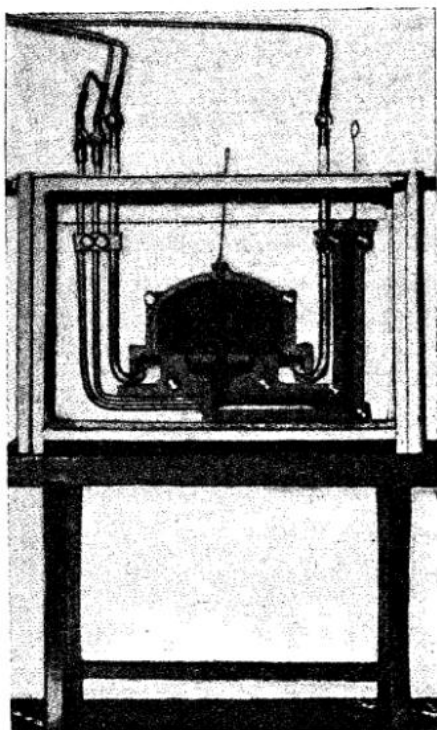


Фиг. 5.

Опыт второй. Чтобы продемонстрировать работу такой печи, плотно закроем отверстие в ключе свода крышечкой. Заполним дымовую трубу на нашей модели керосином, пустим керосин в топку нашей модели, откроем немного дымовую

трубу и мы получим в работе кирпичеобжигательную печь «с обращенной тягой» (фиг. 6).

В печи с обращенной тягой, очевидно, наиболее горячие газы будут собираться у замка купола; но там они останутся; скопясь, они будут выдавливать через дымовые отверстия в подду холодные газы в дымовую трубу и, постепенно понижая свой уровень до самой лещадки, выполнят всю печь горячим пламенем, которое будет стоять во всей полости. Мы получим атмосферу почти неподвижного пыла, гарантирующего равномерный обжиг кирпича.



Фиг. 6.

В этом почти неподвижном пыле легко развить реакции дожигания последних следов свободного кислорода воздуха и последних следов горючих составных частей пламени, т. е. получить горение при теоретическом количестве кислорода воздуха; пламя такого горения идет во всей массе печных газов, лишено ясно выраженных факелов высокой температуры и, потому, особенно пригодно для целей медленного и равномерного нагревания.

Демонстрация модели, погруженной в воду, достаточно ясно подтверждает то основное положение, что движение пламени в печах должно рассматриваться как движение легкой жидкости в среде, заполненной тяжелой жидкостью.

Здесь уместно раз'яснить, каким образом человечество целых сто пятьдесят лет не могло усвоить этой простой аксиомы и считало вопрос о движении печных газов в полостях печи недоступным человеческому [пониманию]. Причина этому в не-

точностях при изложении в учебниках физики основных законов гидравлики. Перечислю их.

а) Гидростатическое давление измеряется весом столба жидкости под центром тяжести отверстия.

Рисуется сосуд, отверстие и ставится размер: h —есть напор; давление равно площади сечения отверстия, умноженной на h и на вес кубической единицы жидкости.

Это не точно. Мы находимся, в атмосфере воздуха и поэтому гидростатическое давление равно весу столба жидкости, минус вес столба воздуха, давящего на открытое отверстие в направлении, противоположном давлению воды. Если сосуд заполнен газами, то поправка ничтожная для воды, делается столь большой, что гидростатическое давление газов делается негативным по отношению к жидкостям (см. ниже), что усваивается очень трудно.

б) Закон Паскаля — излагается в учебниках для невесомой жидкости, но не излагается для жидкостей весомых; для людей, живущих на земле, надо сделать оговорку, что для весомых жидкостей нужно внести поправку на гидростатическое давление жидкости. Эта поправка, легко усвоимая для воды, необычайно трудно усваивается в приложении к газам с негативным гидростатическим давлением.

в) При изложении явления истечение жидкостей в формуле Бернулли опускается давление воздуха. Эта поправка ничтожна и легко усваивается для воды. Но нужно значительное напряжение умственных сил, чтобы усвоить явление истечения газов в атмосферу.

г) Наконец, неверное слово «тяга» дымовой трубы, о чем сказано выше, настолько затемнило вопрос о движении пламени в печах, что мне лично понадобилось пятнадцать лет, чтобы забыть чему меня учили в школе, забыть это несчастное изложение закона Паскаля в элементарных учебниках физики, внести нужные поправки и разобраться в явлениях, происходящих в полостях печи. Я советовал бы прежде, чем читать дальнейшее изложение гидравлической теории взять элементарный учебник физики, внести поправку на окружающий воздух, сделать жидкости тяжелыми и продумать самостоятельно эти несколько страниц учебника.

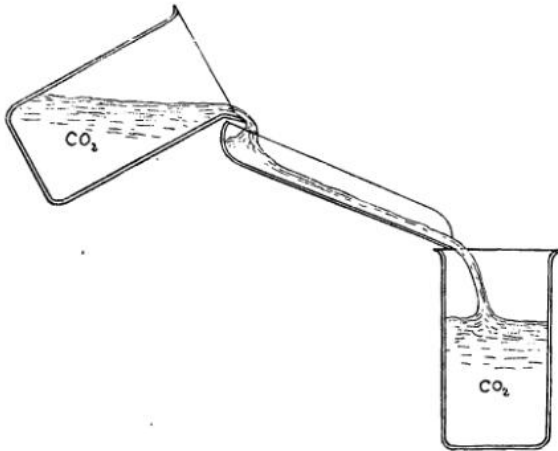
Тогда дальнейшее изложение будет читателю чрезвычайно легко и не представит никакой трудности.

Пламенный поток есть обращенная река.

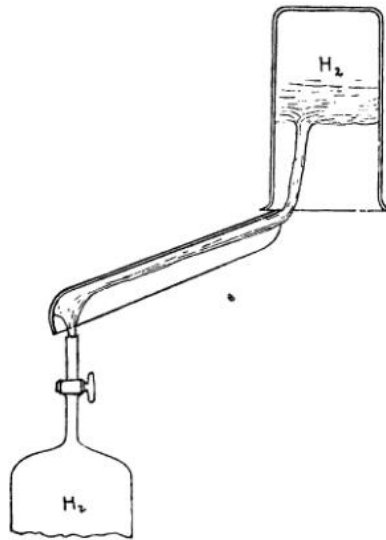
Случаи движения потоков тяжелой жидкости в легкой мы наблюдаем повседневно. Все наши реки есть движение тяжелой жидкости—воды, в легкой—воздухе. Мы знаем, что в таком случае русло потока должно состоять из ограждения снизу и с боков.

Если-бы пламя и печные газы были бы жидкостью, более тяжелой, чем воздух, то нам их тоже пришлось бы оградить снизу и с боков. Но они не тяжелее, а во много раз легче воздуха и потому их приходится ограждать сверху и с боков.

Это нам станет ясным из решения такой задачи: требуется перелить по почти горизонтальному руслу из одного стакана в другой, в первом случае — углекислоту, в другом случае — водород.



Фиг. 7.



Фиг. 8.

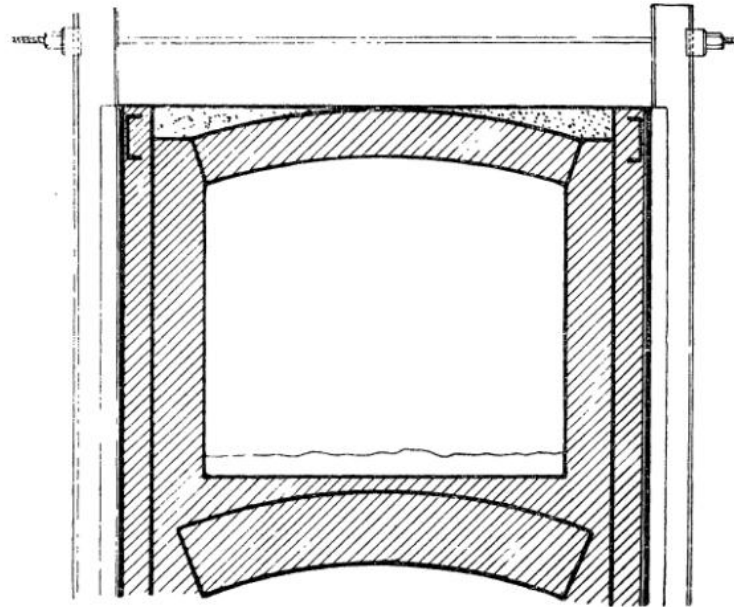
Как это сделать? При переливании CO_2 поток должен быть огражден снизу и с боков (фиг. 7). При переливании H_2 поток должен быть огражден сверху и с боков (фиг. 8).

Нужно ли ограждать поток угольной кислоты сверху, а поток водорода снизу? Конечно, нет. Если окружающий воздух безусловно покоен и весь опыт будет проведен очень аккуратно¹⁾, то никакой нужды в этом нет. Газы перельются, в

¹⁾ В данном случае мы пренебрегаем стремлением газов образовать равномерную смесь.

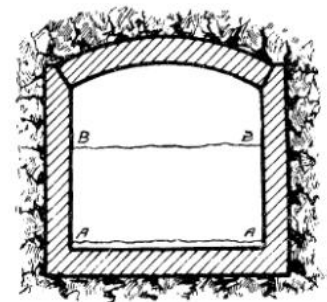
отсутствии ограждения с четвертой стороны, так же совершенно, как и в его присутствии.

Из этого мы делаем нижеследующий вывод: потоки раскаленных газов должны быть ограждены только сверху и с боков. И действительно, все пламенные печи представляют ограждение: сверху (свод) и боковые стенки (фиг. 9). Снизу ограждение может быть, может и не быть. Так же как



Фиг. 9.

водяная река ограждена снизу и с боков, сверху же ее ограничивает зеркало ее поверхности, так и газовая река должна быть ограждена сверху и с боков, низ же ее есть зеркало ее поверхности.



Фиг. 10.

Поэтому в высшей степени будет ошибочно думать, что дымовой боров от четырех паровых котлов всегда выполняется дымом, работают ли четыре котла или один, безразлично. Такое представление будет неправильно. Если на фиг. 10 представлено сечение боровка, то при правильно спроектированном борове (см. ниже) нижнее зеркало газового потока должно коснуться дна боровка AA. Если же количество дыма уменьшится в четыре раза, то глубина газового потока умень-

шится в 2,5 раза²⁾ и зеркало газового потока поднимется до уровня BB , во всем же пространстве бора $ABBA$ движение газов наблюдаться не будет.

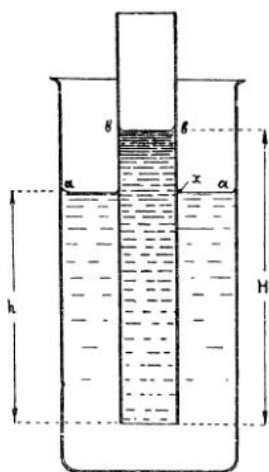
Очевидно, что как глубина реки есть функция от расхода воды, так и глубина газового потока есть функция от количества протекающих газов.

Если опять приравнять холодный воздух воде, а печные газы керосину, то не трудно демонстрировать дымовой бор, выполняемый и не выполняемый керосиновым потоком. Думаю, что и без этой демонстрации ясно, что газовые потоки не требуют ограждения снизу и глубина потока есть функция количества протекающей жидкости.

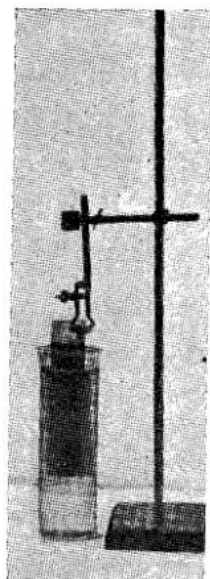
Итак, когда мы думаем о газовом потоке, мы всегда должны воображать себе обращенную реку.

Приложение к пламени законов гидростатики.

Мы видели, что коэффициент расширения газов $\alpha = \frac{1}{273}$; вес куб. метра воздуха при $0^\circ = 1,29$ кг. Вес 1 м^3 продуктов горения обыкновенного топлива колеблется между 1,29 и 1,33 кг при 0° .



Фиг. 11.



Фиг. 12.

При температуре t вес 1 м^3 печных газов будем считать для простоты $\left(\frac{1,29}{1 + \alpha t}\right)$ кг.

Благодаря такому большому коэффициенту расширения газов, как мы видели, разность веса 1 м^3 окружающего нас воздуха (1,29 кг) и веса 1 м^3 печных газов мартеновской печи (0,17 кг) весьма значительна и равна $1,29 - 0,17 = 1,12$ кг.

Эта разность в весе воздуха и пламени есть причина гидростатического давления пламени.

Для выяснения этого явления сделаем такой опыт (фиг. 11 и 12). Пусть aa — уровень воды в стакане, b — ламповое цилиндрическое стекло. В него нальем керосин. Окажется, что уровень керосина в стекле bb будет стоять выше уровня воды в стакане aa , как это подтверждается фотографией фиг. 12.

Разность уровней bb и aa может быть вычислена на основании таких соображений: очевидно столб воды h уравновешивается столбом керосина H . Удельный вес воды = 1; удельный вес керосина = 0,8, откуда следует, что

$$h \times 1 = H \times 0,8$$

или

$$H = \frac{h}{0,8} = 1,25 h,$$

а потому разность уровней

$$H - h = 0,25 h.$$

Если мы возьмем точку x на уровне воды, то со стороны воды она не будет испытывать никакого давления; со стороны же керосина она будет испытывать гидростатическое давление; равное $0,25 h$ мм керосина или $0,25 h \text{ мм} \times 0,8 = 0,2 h$ мм воды.

Видоизменим этот опыт.

Возьмем стакан с водой и опустим туда пробирку вверх дном и заполним эту пробирку керосином. Совместим доньшко пробирки с поверхностью воды в стакане и зададим себе вопрос какое гидростатическое давление испытывает доньшко пробирки (фиг. 13)?

Очевидно на уровне BB мы имеем равновесие давлений — воды на керосин и керосина на воду, т.-е., $P_{\text{воды}} = P_{\text{керос.}}$

Давление воды на единицу площади в миллиметрах водяного столба измеряется столбом воды высотой h , т.-е.

$$P_{\text{воды}} = h \times \text{уд. вес воды} = 1 \times h \text{ мм воды.}$$

Давление, в тех же единицах, керосина измеряется:

1) весом столба керосина и 2) некоторым гидростатическим давлением δ , которое мы хотим определить. Откуда

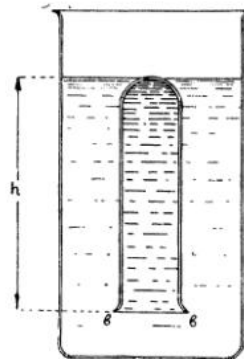
$$P_{\text{керос.}} = (h \times \text{уд. вес керосина}) + \delta = (0,8h + \delta) \text{ мм воды.}$$

Вставив эти величины в уравнение, получим:

$$h = 0,8 h + \delta;$$

откуда

$$\delta = h (1 - 0,8) = + 0,2 h \text{ мм воды.}$$



Фиг. 13.

²⁾ или $\sqrt[3]{(4)^3}$ (см. ниже).

Если мы воду заменим холодным воздухом, керосин — раскаленными печными газами, то нами может быть установлен следующий закон гидростатического давления в полостях, заполненных раскаленными газами:

Гидростатическое давление в кг на квадрат. метр в полости раскаленных газов на высоте H от зеркала их, равно разности веса в кг одного m^3 наружного воздуха и веса одного m^3 раскаленных газов, умноженной на эту высоту, или

$$\delta = H m \times (\text{вес } m^3 \text{ возд.} - \text{вес } m^3 \text{ раск. газов}).$$

Пример: если $H = 0,7$ м, вес $1 m^3$ наружного воздуха $1,29$ кг и вес $1 m^3$ раскаленных газов при 1200° равен:

$$p_{1200} = \frac{1,33}{1 + \frac{1200}{273}} \text{ кг,}$$

то

$$\delta = 0,7 \left(1,29 - \frac{1,33}{1 + \frac{1200}{273}} \right) = 0,7 (1,29 - 0,25) = 0,728 \text{ кг на } 1 m^2,$$

или $0,728$ мм воды, ибо давление в 1 кг на m^2 есть давление столба воды высотой 1 мм.

Что действительно легкие печные газы, выполняющие полости печи, имеют давление выше атмосферного, можно убедиться когда угодно. Мы открываем душник в обыкновенной комнатной печи и струя горячего воздуха с силой вырывается из него в комнату.

Что движет горячий воздух? Откуда эта энергия движения?

Мы открываем гляделку в верхней части регенератора в мартеновской печи. Если регенератор не соединен с дымовой трубой, то из него вырывается с энергией поток раскаленного газа или воздуха. Что движет их?

На колошнике самодувного генератора мы открываем пробку. Из отверстия вырывается генераторный газ. Какая сила заставила воздух пройти через слой дров или каменного угля, обратиться в газ и все таки сохранить достаточно упругости, чтобы дать струю газа?

Что дело не в температуре газов, а в их легкости, видно из того, что полости, выполненные холодными, но легкими газами, всегда имеют давление выше атмосферного.

Например, возьмем аэростат в 10 м высоты, заполненный водородом (фиг. 14). Определим гидростатическое давление водорода в вершине шара. Так как шар открыт снизу, то на горизонте aa газы находятся в равновесии и общее их давление равно атмосферному.

Следовательно, вес столба холодного воздуха в 10 м высотой, (равный $1,29 \text{ кг} \times 10 \text{ м}$), уравновешивается весом столба водорода в 10 м высоты + некоторое искомое гидростатическое давление δ .

Вес $1 m^3$ водорода равен $1,29 \times 0,06927$, откуда получим такое уравнение:

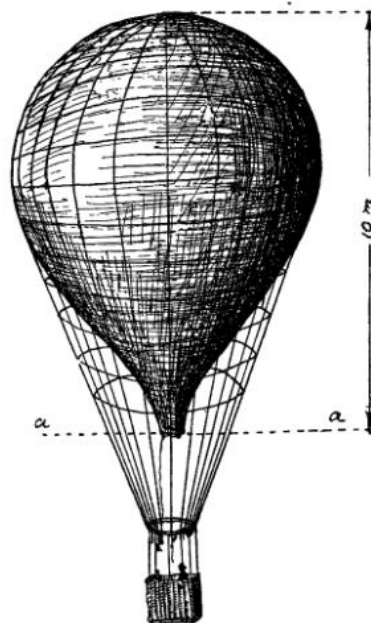
$$1,29 \times 10 = 1,29 \times 0,06927 \times 10 + \delta$$

$$\delta = 10 \times 1,29 (1 - 0,06927) = 12,006 \text{ кг}/m^2$$

или

$$\delta = 12 \text{ мм водяного столба.}$$

Это гидростатическое давление водорода в вершине воздушного шара заставляет нас применять весьма прочную материю для оболочки шара. Оно



Фиг. 14.

заставляет раздуваться заполняемый водородом шар; оно родит скорость водорода в верхнем клапане при выпуске водорода из шара.

Многие из нас в детстве забавлялись пусканием монгольфьеров из бумаги, наполняемых теплым воздухом самовара или лампы. Вспомните момент наполнения шара теплым воздухом; теплый воздух, входя в шар, раздувает его, расправляет все складки и морщинки оболочки. Этого не было бы, если бы давление теплого воздуха в шаре не было бы выше атмосферного.

Так как вопрос о гидростатическом давлении в полостях, заполненных теплыми газами, есть основание всей гидравлической теории расчета пламенных печей, то позволю себе остановиться на одном частном примере, взятом из обиходной нашей жизни.

Имеем городское здание снабженное газом и водой. Для нас совершенно очевидно, что гидроста-

тическое давление воды в нижнем этаже будет выше, чем в верхнем этаже. Положение это ясно и доказательств не требует.

Но зададим себе вопрос, каково будет гидростатическое давление газа в верхнем этаже, ниже или выше, чем в нижнем?

Если в нижнем этаже мы имеем давление газа в 25 мм воды, спрашивается, какое давление будет на 10 м выше?

Допустим, что у рожка *A* давление атмосферное (фиг. 15).

Тогда давление столба воздуха на единицу площади, равное $1,29 \text{ кг} \times 10$, должно будет уравновеситься весом столба газа в 10 м высотой $\pm \delta$,



Фиг. 15.

— гидростатическое давление газа. Вес 1 м^3 газа равен $(1,29 \text{ кг} \times 0,4)$, откуда получим уравнение:

$$1,29 \times 10 = 1,29 \times 0,4 \times 10 \pm \delta;$$

откуда:

$$\delta = 1,29 \times 10 \times (1 - 0,4) = 7,74 \text{ кг/м}^2,$$

но давление газа у нас в точке *A* не атмосферное, а выше атмосферного на 25 мм воды.

Придадим поэтому обеим частям уравнения ± 25 мм воды, помня при этом, что 1 кг на м^2 есть давление 1 мм воды. Тогда получим, что давление в точке *B* будет:

$$\delta + 25 \text{ мм} = 25 + 7,74 = 32,74 \text{ мм}$$

т. е. давление газа в верхних этажах всегда выше, чем в нижних. Зависимость обратная, чем для воды.

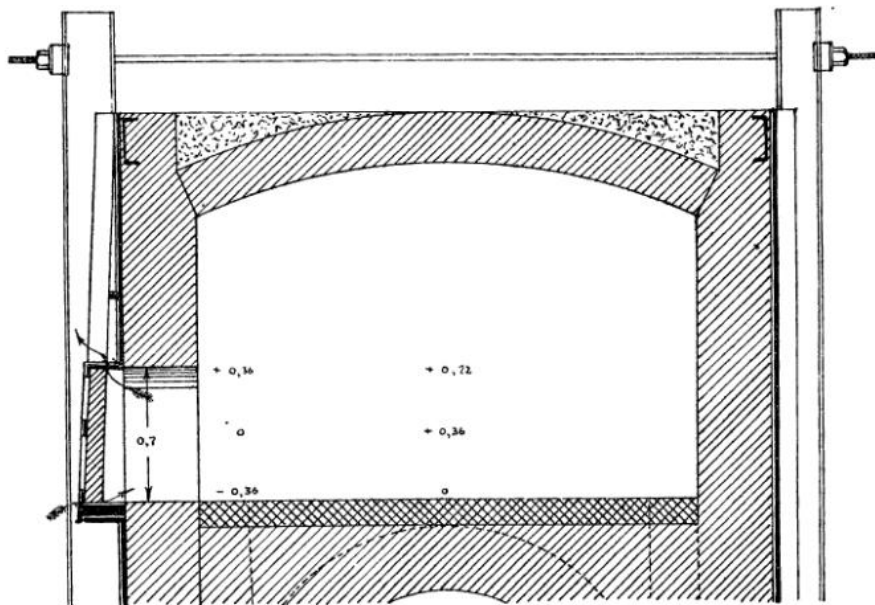
Раскрывая *Hütte*, мы читаем в главе о светильном газе: «Подъем газопровода на 10 м увеличивает давление на 7 мм воды».

Отсюда следует нижеследующее правило расположения газовых заводов, заинтересованных в равномерном давлении газа во всей городской сети:

«Завод надо располагать в самой низкой части города так, чтобы самые высокие участки города находились дальше от завода, а низкие — ближе к заводу; тогда потеря давления газа от трения в трубопроводах будет компенсироваться увеличением давления в трубах, вследствие подъема местности по мере удаления от завода».

Теперь, когда мы познакомились с гидростатическим давлением, нам станет ясно явление ореола у заслонок пламенных печей.

Так как всякая пламенная печь представляет полость известной высоты, заполненную раскален-



Фиг. 16.

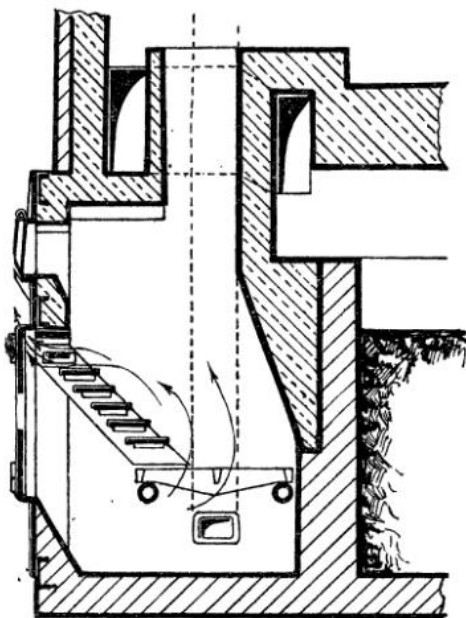
ными газами, то в ней по высоте всегда оказываются различные давления. Например, в сварочной печи при высоте заслонки в 700 мм и при наличии давления на поду, равного атмосферному, согласно стр. 9, на уровне верхнего края заслонки будет давление равное $\pm 0,728$ мм воды (фиг. 16). Следствием давления выше атмосферного явится большой ореол пламени, прорывающегося через верхний зазор между заслонкой и наличником печи.

Чтобы уменьшить потерю пламени через этот зазор, часто, прибавляя тягу, устанавливают атмосферное давление не на поду печи, а по середине ее высоты; тогда мы наблюдаем такое явление:

давление на поду делается меньше атмосферного ($-0,36$ мм) и наружный воздух засасывается под заслонку, а давление у верха заслонки ослабляется в два раза ($+0,36$ мм) и потеря пламени уменьшается.

Гидростатическим давлением легко объясняется неправильная работа ступенчатой решетки в дровяных генераторах, в которых мы часто замечаем поток газов, указанный стрелкой на фиг. 17. Отрицательное давление на уровне горизонтальных колосников сменяется положительным у верхней ступеньки, из-под которой внаружу начинает выбиваться газ, сгорающий совершенно напрасно.

Гидростатическим давлением легко объяснить и так называемую «тягу» самодувных генераторов или сифон бр. Сименс (фиг. 18).



Фиг. 17.

Генераторный газ поступает в кирпичную башню при средней температуре 600°C ; затем он вступает в длинный горизонтальный железный газопровод, где температура его падает, допустим, — до 300° . Около печи газ спускается в подземный боров при помощи вертикальной трубы при температуре около 200° . Если высота башни 9 метров, вес одного м^3 газа при 0°C равен 1,07 кг, то гидростатическое давление газа вверху башни будет:

$$\delta_{600} = 9 \cdot \left(1,29 - \frac{1,07}{1 + \frac{600}{273}} \right) = 9 \times 0,96 = 8,64 \text{ мм вод. столба.}$$

Для того, чтобы опустить теплый газ в вертикальном колене, придется преодолеть в этом колене гидростатическое давление этого газа при температуре 250°C .

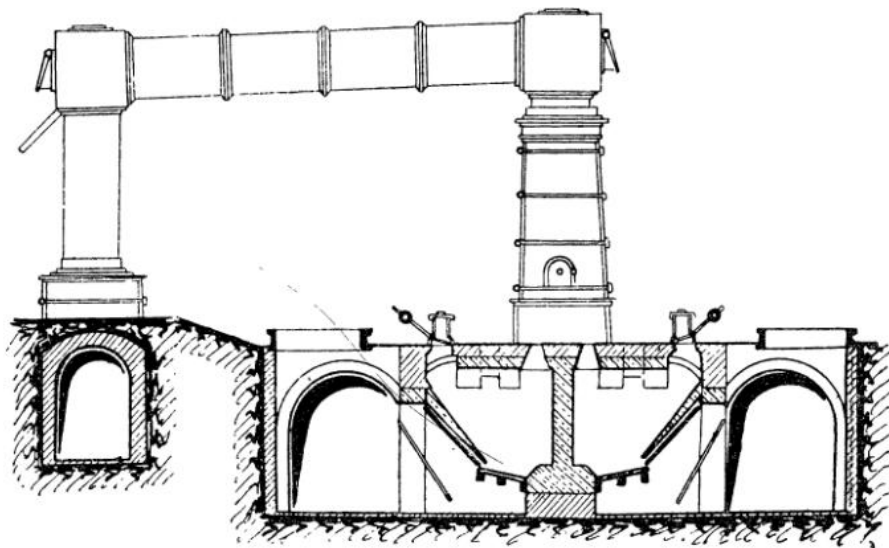
Сопротивление, равное гидростатическому давлению этой вертикальной трубы, будет равно:

$$\delta_{250} = 9 \cdot \left(1,29 - \frac{1,07}{1 + \frac{250}{273}} \right) = 9 \cdot 0,73 = 6,57 \text{ мм воды.}$$

А посему гидростатическое давление газа по достижении им подземного боровка окажется равным:

$$\Delta = \delta_{600} - \delta_{250} = 8,64 - 6,57 = +2,07 \text{ мм воды.}$$

Так как сопротивление газопровода движению газа обыкновенно меньше 2,07 мм воды, то «сифон» бр. Сименс способствует «тяге» генераторов. Очевидно, что тяга генераторов будет тем сильнее, чем газопровод длиннее и чем ниже падает температура газа в горизонтальной части трубы.



Фиг. 18.

Подъем горизонтальной трубы на большую высоту над подом генератора обеспечивает значительный избыток давления газа сверх атмосферного, что является лучшей гарантией генераторов от взрывов.

Напротив того, устройства, где газ из генератора непосредственно поступает в подземный боровок, плохо обеспечены от возможности взрывов, ибо давление газа в них весьма слабое и часто такие генераторы работают с отрицательным давлением в боровке.

Применим наши расчеты гидростатического давления к доменным газопроводам. При широких колошниках древесноугольных доменных печей, при сравнительно небольшом количестве доменных газов, потери в % отношении через колошник бывают значительны и, конечно, тем больше, чем давление доменных газов в газопроводах больше. Поэтому

чрезвычайно важно иметь метод расчета неизбежного давления газа в газопроводах и этим путем определить избыток давления, явившийся следствием несовершенств устройства газопровода, т.е. узости труб, крутых переломов и т. п.

Имеем доменную печь 20 м высотой, вес 1 м³ доменного газа равен 1,22 кг, средняя температура 200°С.

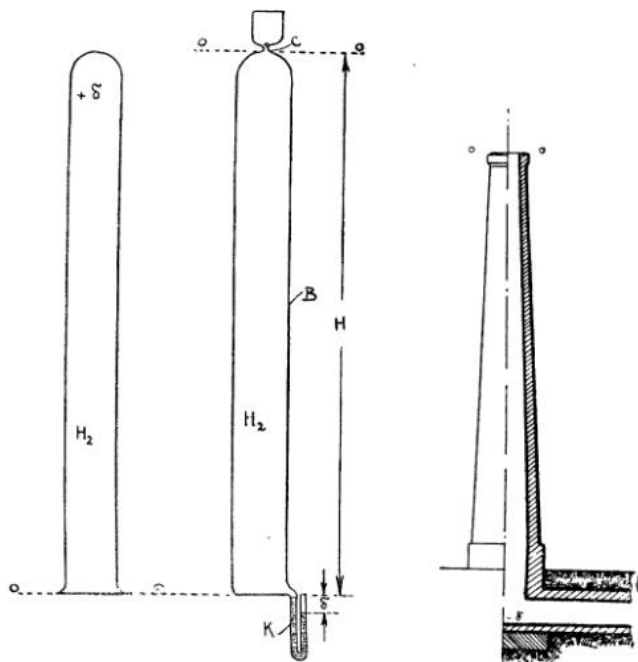
Нужно определить гидростатическое давление под крышкой доменной печи, если газ проведен к паровым котлам, расположенным на 3 м ниже лежачи печи, а давление в газопроводе у котлов по закону не может быть ниже атмосферного?

Газопровод представляет полость в 23 метра высотой, заполненную легким газом, вес 1 м³ которого равен

$$p_{200} = \frac{1,22}{1 + \frac{200}{273}} = 0,705 \text{ кг.}$$

гидростатическое давление будет равно

$$\delta = 23 \times (1,29 - 0,705) = 23 \times 0,585 = 13,45 \text{ мм в. с.}$$



Фиг. 19.

Фиг. 20.

Фиг. 21.

Это давление в 13,45 мм воды неизбежно, все же давление сверх того (в древесноугольных домнах это давление при узких газопроводах доходит до 35 мм воды), есть следствие плохо устроенного газопровода и может быть уменьшено его перестройкой. Как рассчитать сопротивление газопровода трению будет сказано ниже.

Если мы имеем (фиг. 19) пробирку, опрокинутую дном вверх и заполненную водородом, то при атмосферном давлении на уровне *oo*, мы получим в верхней части пробирки положительное давление $+\delta$.

Видоизменим опыт. Возьмем сосуд с водородом *B*, имеющий в верхней своей части волосную трубку и в ней капельку воды. (Фиг. 20).

Эта капелька воды может выпустить из сосуда весь избыточный против давления атмосферы водород, не сообщив сосуда с воздухом, так что на уровне *oo* очевидно имеет место давление атмосферы. Спрашивается, какое давление покажет манометр *K*, поставленный у дна этого сосуда? Очевидно на уровень жидкости манометра в правом колене будет давить столб воздуха $H + \delta$ весом: $1,29 (H + \delta)$ кг.

Этот столб воздуха должен будет уравновеситься столбом *H* водорода, который легче воздуха, и столбиком воды δ , который укажет на необходимость, неизбежность разрежения водорода на дне сосуда *B*, так как только при наличии такого разрежения возможно равновесие капельки *C*.

Величину разрежения не трудно вычислить по общей формуле:

$$-\delta = 1,29 \times 0,06927 \times H - (H + \delta) 1,29.$$

Заметим, что всякая дымовая труба (фиг. 21) представляет рассмотренный случай. Это — полость, наполненная легким газом и открытая сверху. Так же как и в рассмотренном выше случае, дым в основании дымовой трубы имеет давление газов ниже атмосферного. Это явление хорошо известно под именем разрежения, даваемого дымовой трубой.

Допустим, нам дана следующая задача:

В рабочем пространстве мартеновской печи мы имеем атмосферное давление. Из рабочего пространства печные газы при температуре 1600° спускаются в регенераторы, остывают здесь и при температуре 400° уходят в дымовую трубу. Вес одного 1 м³ печных газов 1,30 кг. Спрашивается, какое гидростатическое давление должны мы иметь на уровне пода регенераторов, если расстояние его от рабочего пространства печи равно шести метрам? (Сопротивлением печи пока пренебрегаем).

Из предыдущего очевидно, что у пода регенераторов давление должно быть отрицательным. Для движения теплых легких газов вниз, дымовая труба должна будет высасывать печные газы и должна будет возбудить разрежение у пода регенераторов, равное

$$\begin{aligned} -\delta &= -6 \times \left(1,29 - \frac{1,30}{1 + \frac{(1600+400):2}{273}} \right) = \\ &= -6 \cdot \left(1,29 - \frac{1,30}{4,66} \right) = -6,06 \text{ мм в. с.} \end{aligned}$$

Итак, если полость выполнена легким газом и линия атмосферного давления проходит у пода полости, то вверху полости получается давление выше атмосферного. Если линия атмосферного

давления проходит по верху полости, то у пода полости мы имеем отрицательное давление.

Проще говоря, когда легкий газ имеет возможность подниматься вверх, то он так сказать набирает гидростатическое давление. Напротив того, когда легкий газ нужно спустить вниз, то придется создать разрежение для того, чтобы осуществить такое движение.

Связь между напором, давлением и скоростью в потоках капельных жидкостей и газов.

Если мы имеем какой-нибудь поток, канал, реку, то скорость воды в нем есть следствие затраченного напора.

Так как дно потока всегда шероховато, то скорость потока постоянно приходится поддерживать, затрачивая на рождение потерянной скорости напор. Вода в реке движется в том случае, если верхнее зеркало потока имеет падение, достаточное для компенсации потерь в скорости от сопротивления дна и стенок потока.

Таким образом, вне расхода напора нет движения потока и если поток движется, то на рождение скорости потока был затрачен напор.

Если скорость потока v , то

$$v = \sqrt{2gh} \text{ и } h = \frac{v^2}{2g}$$

где h есть скоростной напор той жидкости, которая движется (воды, керосина, мазута, чугуна, ртути и т. п.).

Например, для движения жидкости со скоростью 4,43 м/сек. нужно по формуле $v = \sqrt{2gh}$ израсходовать напор h , равный 1 метру. Это будет метр: воды, керосина, мазута, чугуна, стали, ртути, вообще жидкости, которая движется.

Если выразить этот метр напора в кг на квадратный метр, то для разных жидкостей мы найдем различное давление, вызывающее скорость в 4,43 м/сек.

для воды это будет . . .	1.000	кг/м ²	(0,1	атм.)
керосина :	800	"	(0,08	")
мазута	900	"	(0,09	")
чугуна	6.900	"	(0,69	")
ртути	13.595	"	(1,395	")

Если давление выразим в миллиметрах воды, то получим: для воды 1000 мм, для керосина 800 мм, мазута 900 мм, ртути 13595 мм воды.

Таким образом, какова бы ни была природа движущейся жидкости, определенной ее скорости

соответствует совершенно определенный скоростной напор, находимый из ур-ния:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Что же касается давления, необходимого для сообщения движения жидкости, то для разных жидкостей это давление различно и прямо пропорционально уд. весу жидкости.

Если мы перейдем к движению газов, то мы должны будем принять те же основные положения.

1. Вне затраты напора нет скорости ибо затрата напора и скорость связаны между собой, как причина и следствие.

2. Данной скорости соответствует определяемый из выражения $v = \sqrt{2gh}$ напор того газа, который находится в движении.

3. Одна и та же скорость газов различных плотностей порождается одним и тем же напором, но разными давлениями и упругостями газов.

Давления и упругости прямо пропорциональны удельным весам газов или весам единицы их объема.

Так как, газы принадлежат к разряду жидкостей, удельный вес коих резко меняется при повышении температуры, то третье положение имеет очень большое значение при расчете механизма движения пламени.

Перейдем к примерам.

1. В полость мартеновской печи горячий воздух вводится через пролеты со скоростью 18 м/сек. при температуре в 1000°С. Спрашивается, какую упругость надо сообщить этому воздуху, чтобы могла в нем развиваться такая скорость?

Для того, чтобы сообщить скорость потоку какой бы то ни было жидкости или газа в 18 м/сек. надо израсходовать напор

$$h = 16,51 \text{ м. } ^1)$$

В данном случае движется воздух, нагретый до 1000°С, вес 1 м³ его будет

$$B_{1000} = \frac{1,29}{1 + \frac{1000}{273}} = \frac{1,29}{4,66} = 0,277 \text{ кг.}$$

Столб горячего воздуха при 1000°С, в 16,51 метра высоты окажет давление на 1 м²

$$\delta = 0,277 \times 16,51 = 4,57 \text{ кг/м}^2$$

или $\delta = 4,57 \text{ мм вод. столба.}$

Следовательно, для того, чтобы обеспечить горячему воздуху скорость в пролетах в 18 м/сек. необходимо располагать давлением в 4,57 мм воды.

Откуда берется это давление? Кто его создает? Это давление есть гидростатическое давление, которое создается полостью регенераторов и вертикальных каналов, заполненных горячим воздухом.

¹⁾ См. приложения к V части.

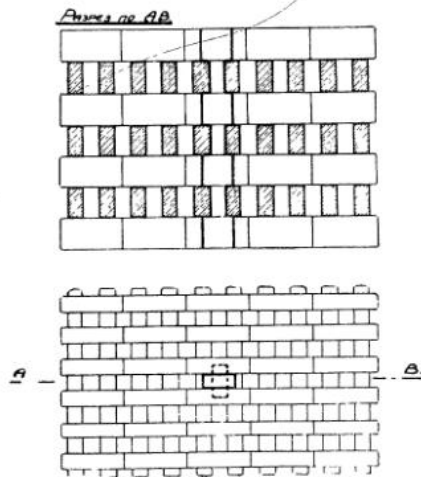
Если допустить, что при проходе воздуха через насадку регенераторов и по каналам потерь нет, то можно высчитать высоту регенераторов, необходимую для того, чтобы создать это гидростатическое давление. Допущение, что в регенераторах нет потерь, конечно неправильно, оно всегда есть, а потому в приведенном ниже расчете мы получим высоту преуменьшенную.

Приняв температуру воздуха внизу регенераторов в 50°C , в головках 1000°C , получим среднюю температуру 525°C . Гидростатическое давление получит величину:

$$\delta = 4,57 = H \left(1,29 - \frac{1,29}{1 + \frac{525}{272}} \right)$$

$$H = \frac{4,57}{1,29(1 - 0,34)} = 5,37 \text{ м.}$$

Итак, глубина регенераторов и каналов не может быть меньше $5\frac{1}{2}$ м. Только регенераторы глубины большей $5\frac{1}{2}$ м способны дать скорость воздуху в головках в 18 м/сек.



Фиг. 22.

В настоящую минуту мы подошли к самой сущности механизма движения печных газов. Резюмируем ее так:

Полости печи, заполненные горячими газами, создают в верхних своих частях положительное гидростатическое давление, которое расходуется на сообщение пламени скоростей при движении его в печи.

Приобретенная скорость при движении теряется пламенем от двух причин:

- 1) Трения потока о стенки; его мы до сих пор учитывать не можем за отсутствием наблюдений.
- 2) Потери скорости от изменения направления струи.

При расчете вентиляционных каналов считают, что при повороте струи на 90° вся скорость те-

ряется, примем эту норму и мы. Поворот на 180° будем считать как два поворота на 90° , т.е. потерю будем считать равной двум скоростным напорам. Поворот на 45° , как потерю 0,6 скоростного напора.

Изменение скорости потока условимся считать так: если газ из узкого пролета вступает в широкую полость и v_{max} меняется на v_{min} , то потери нет, но на рождение скорости в следующем узком месте придется затратить опять скоростный напор.

Вот, например, метод расчета сопротивления решетки регенераторов: решетка состоит из вертикальных каналов $4\frac{1}{2}'' \times 2\frac{1}{4}''$, суживающихся при переходе из ряда в ряд до $2\frac{1}{4}'' \times 2\frac{1}{4}''$, т.е. в два раза (фиг. 22).

Скорость газа в узком месте v_{max} , в широком $v_{min} = v_{max} : 2$. При переходе газа из узкого места в широкое затраты скоростного напора нет.

Но при переходе из широкого в узкое надо из скорости v_{min} создать скорость v_{max} . Если скорости v_{min} соответствует напор h_{min} , а v_{max} соответствует h_{max} , то очевидно на рождение скорости v_{max} из v_{min} придется затратить

$$(h_{max} - h_{min}).$$

Эта величина и будет сопротивлением одного ряда регенеративной решетки.

Если рядов N , то сопротивление их будет равно

$$\delta_{pec} = N (h_{max} - h_{min}) \cdot p_t$$

где p_t есть вес 1 м^3 движущегося при температуре t газа

II. Определить сопротивление решетки регенератора проходу воздуха высотой 6 м (52 ряда); средняя температура воздуха $\frac{50^{\circ} + 1050^{\circ}}{2} = 550^{\circ}\text{C}$;

скорость $v_{min} = \frac{1}{2}$ м/сек, $v_{max} = 1$ м/сек?

Получим вес м^3 воздуха при 550° :

$$p_{550} = \frac{1,29}{1 + \frac{550}{273}} = 0,43 \text{ кг.}$$

Скорости $v_{min} = \frac{1}{2}$ м/сек. соответствует $h_{min} = 0,013 \text{ м}$

Скорости $v_{max} = 1$ м/сек. соответствует $h_{max} = 0,051 \text{ м}$

$$(h_{max} - h_{min}) = 0,038 \text{ м}$$

$$\delta_{pec} = 52 \times 0,038 \times 0,43 = 0,85 \text{ мм воды.}$$

Итак, сопротивление решетки 0,85 мм воды, а дает эта решетка при высоте 6 м гидростатическое давление:

$$\Delta = 6 (1,29 - 0,43) = 5,16 \text{ мм. воды.}$$

Следовательно, в конце-концов, в регенераторе давление воздуха получит приращение

$$5,16 - 0,85 = 4,31 \text{ мм воды.}$$

Руководствуясь изложенными соображениями, мы можем рассмотреть гидравлические работы мартеновской печи.

Фигура 23 представляет модель разреза печи Мартена между двумя зеркальными стеклами, опущенную в аквариум; по полостям печи движется керосин. Механизм движения ясен: регенераторы нагревая воздух и газ, создают положительное гидростатическое давление. Это давление расходуется на придание движущимся газам скоростей и сполна расходуется на все скорости газов вплоть до рабочего пространства.

В рабочем пространстве газы имеют незначительные скорости и давление газов равно атмосферному, ибо при обилии окон и заслонок другого давления в рабочей полости иметь невозможно,

Начиная от рабочего пространства, где царствует атмосферное давление, начинается опускание легких газов вниз в регенераторы, перекидные клапаны и дымовую трубу. Для того, чтобы опустить легкие печные газы вниз, на поду регенераторов необходимо установить отрицательное давление, разрежение, в чем и состоит задача дымовой трубы.

Итак, роль дымовой трубы двоякая:

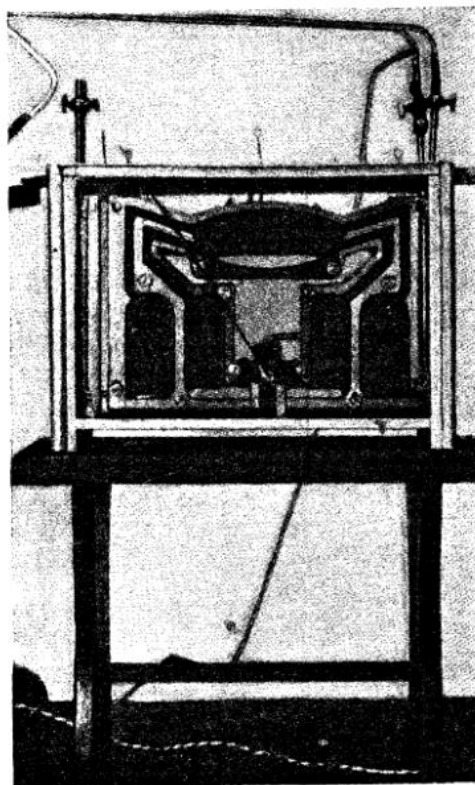
1. Опустить горячие газы на уровень пода регенераторов.
2. Создать во всех полостях печи скорости печных газов, которые эти последние теряют, меняя свое направление и двигаясь вдоль негладких стен печи.

Расчет гидравлики пламенной печи введен в цикл обязательных упражнений для студентов; этим методом рассчитаны очень многие печи русских заводов и вот те общие выводы, к которым я пришел, контролируя эти расчеты.

Подсчитывались обыкновенно действующие в заводах печи. Брался суточный расход горючего. Подсчитывалось количество генераторного газа, при чем руководством служил предложенный мною алгебраический метод (см. ч. I). Вычислялось количество печных газов при полуторном расходе вторичного воздуха. Проверка действующих печей показала следующее:

1. При дурно конструированных печах Мартена, страдающих быстрым засариванием регенераторов и потому имеющих краткие кампании, скорости оказывались очень большими и гидростатического давления горячего воздуха и газа в регенераторах и вертикальных каналах доставало только в обрез на рождение их скоростей; иногда же мы получали отрицательный результат, т.е. приходили к выводу, что по расчету печь следовало бы пустить на дутье; но так как печь, хотя и не важно, работала как самодувная, то логический вывод, сделанный мною, был тот, что предложенный метод расчета—есть расчет с запасом.

2. Газовый и воздушный регенератор требуют для своего питания различное количество печных газов. Определяя расчетом количество газов которые должны пройти через газовый и воздушный регенераторы по отдельности, и сосчитывая тягу дымовой трубы, необходимую для того, чтобы протащить нужное количество газов через тот и другой регенератор для некоторых печей, мы находим почти одинаковую степень разрежения дымовой трубы. Напротив того, для печей американских, где воздух поступает со скоростью в пролетах 8—10 м/сек., а газ со скоростью в головках до 58 м/сек., (искусственное дутье), тяга дымовой трубы для газовых и воздушных регенераторов



Фиг. 23.

резко разнится. Вот тут то и выясняется роль отдельных заслонок для газовых и воздушных регенераторов.

Общее же впечатление всех расчетов таково, что отдельные заслонки для газовых и воздушных регенераторов обязательны.

3. Наконец, хотя редко, но встречаются мартеновские печи, которые сообщают горячему воздуху и газу гидростатическое давление гораздо большее, чем надо (Льсьвенский завод),

Объясняется это тем, что скорости в печи небольшие, перекидные клапаны большого размера ¹⁾.

¹⁾ Узость перекидных клапанов один из главных недостатков современных печей.

На таких печах приходится работать, прикрывая газовый и воздушный клапан, пока печь новая. Когда печь состарится, регенераторы засорятся пылью, сопротивление, искусственно введенное пережимом струи вступающего газа и воздуха, постепенно уменьшается и печь оказывается способной работать и при засоренных регенераторах.

Запас гидростатического давления газов дает возможность при начале работы печи ввести в воздушном и газовом клапане реостат, выключая который, мы удлиняем кампанию печи. Вот разгадка, почему в одних заводах насадку регенераторов выкидывают каждые 100 - 250 плавков, в других же печах регенераторы выдерживают по полгода и больше.

Итак, введение в практику подсчета гидравлики газов мартеновской печи дает нам критерий конструкции печи. Подсчет делает совершенно излишним весь арсенал «данных практики», «пропорциональных размеров» и прочий балласт, который держат в памяти современные мастера стального дела.

Приложение к пламени законов истечения жидкости через отверстие в дне сосуда.

На фиг. 5 изображена модель кирпичеобжигательной печи, в которой продукты горения отводятся сверху. Посмотрим по каким законам происходит в этом случае истечение из отверстия в своде печи.

Для случая истечения воды в пустоте мы имеем:

$$Q = k_1 \cdot k_2 \cdot \omega \cdot \sqrt{2gh}$$

где $\sqrt{2gh}$ — есть теоретическая скорость падения тела в пустоте и, по закону Торичелли, теоретическая скорость истечения жидкости при напоре ее h ;

ω — площадь сечения отверстия,

Q — расход жидкости в секунду,

k_1 — коэффициент сжатия струи, т.-е. отношение площади сжатой струи к ω (обыкновенно 0,64),

k_2 — коэффициент скорости, т.-е. отношение действительной скорости к теоретической (обыкновенно 0,97).

Оставляя в стороне коэффициенты сжатия и скорости (k_1 и k_2) рассмотрим случай истечения керосина в воду (фиг. 24).

Гидростатическое давление в отверстии ω будет равно весу столба воды высотой H — минус вес такого же столба керосина т.-е.:

$$\delta = H (1 - 0,8)$$

или в общем виде

$$\delta = H (B_{\text{воды}} - B_{\text{керос.}})$$

где $B_{\text{воды}}$ и $B_{\text{керос.}}$ — удельные веса воды и керосина или, что все равно, веса кубической единицы.

Напор должен быть выражен в метрах столба той жидкости, которая вытекает, поэтому для h получим:

$$h = H \frac{B_{\text{воды}} - B_{\text{керос.}}}{B_{\text{керос.}}}$$

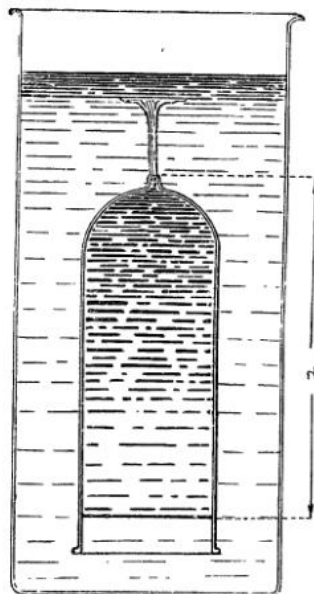
Вставив это в уравнение для расхода, получим для расхода легкой жидкости (керосина), вытекающей через отверстие в тяжелую, такое выражение:

$$Q = k_1 \cdot k_2 \cdot \omega \cdot \sqrt{2gH \frac{B_{\text{воды}} - B_{\text{керос.}}}{B_{\text{керос.}}}} \dots (A)$$

Если мы перейдем от воды и керосина к воздуху и печным газам, то для расчета печей получим такую формулу:

$$Q = k_1 \cdot k_2 \cdot \omega \cdot \sqrt{2gH \frac{B_{\text{воз.}} - B_{\text{печи. газ.}}}{B_{\text{печи. газ.}}}} \dots (B)$$

где H высота уровня нижнего зеркала печных газов под отверстием в своде печи.



Фиг. 24.

На фиг. 5 (стр. 5) отверстию в куполе придана такая площадь ω , что нижнее зеркало керосина установилось на расстоянии H от отверстия. Очевидно, вставив в урние (A) величины, которые можно определить из этого опыта — Q , ω и H , мы можем определить и коэффициенты k_1 k_2 , но до сих пор этого не сделано.

Для газов и больших отверстий эти коэффициенты вероятно близки к единице и таковыми мною при решении задач пока принимаются. Что фиг. 5 имеет место и при управлении пламенными печами, я имел случай наблюдать в заводе б. бр. Корниловых в Ленинграде вместе с И. Г. Есьманом. Во втором этаже печи для обжига фарфоровых изделий, пламя которой удаляется через купол, ясно было видно нижнее зеркало печных газов на высоте 1—1½ метра от пода печи.

Очевидно, это зеркало можно было бы опустить на под верхней камеры, если бы уменьшить отвер-

стие в куполе печи, т.-е. сделать то же, что мы сделали на модели, стеснив выход керосина через отверстие в куполе.

Совместив нижнее зеркало печных газов с подом камеры, мы достигаем возможного максимума в равномерности обжига при этой устарелой и нерациональной системе печи. Полная равномерность обжига возможна, как мы видели, при работе на печах с обращенной тягой (фиг. 6, стр. 6).

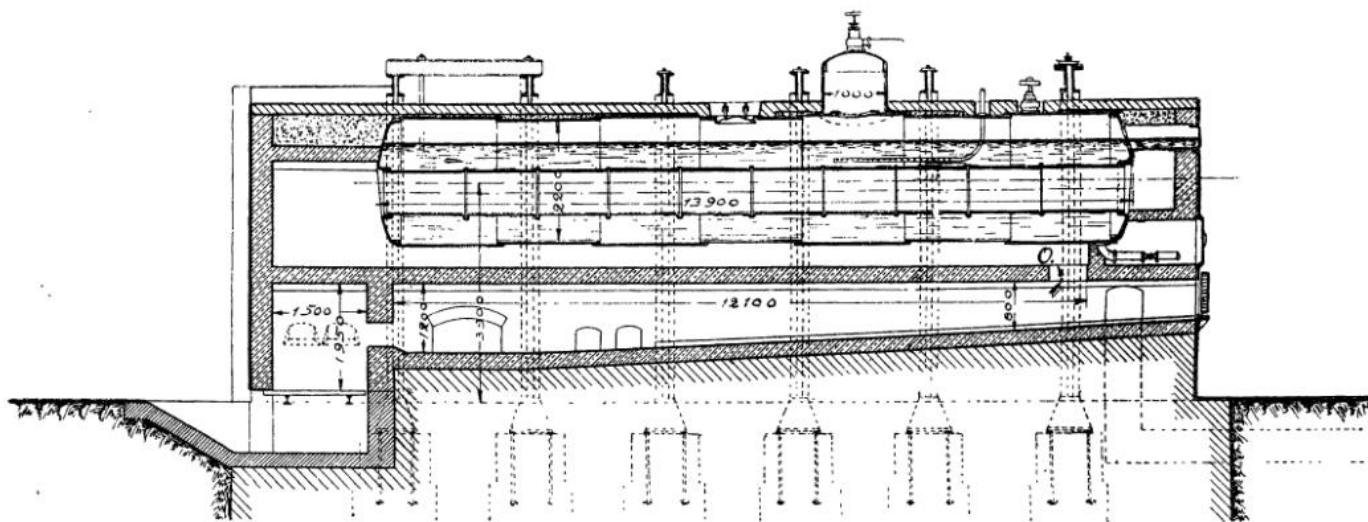
Удаление дыма через отверстие в своде было излюбленной системой печей в старое время¹⁾ и, хотя в новейших печах эта система отвергается самым решительным образом, однако я приведу, все же, пример расчета величины отверстия в своде печи.

Дана печь для подогрева слитков Луганского завода (фиг. 25).

Итак, по вычислению, расстояние от отверстия в ключе свода до нижнего зеркала, при выпуске газов в атмосферу, будет 803 мм. Сделано в действительности 800 мм (см. фиг. 25), что свидетельствует о том, что в этой печи соблюдено очень старое правило, говорящее:

«Чтобы пламенная печь работала хорошо, пламя должно лизать подину печи».

Приведя пример расчета размеров дымового пролета в своде отражательной печи, я должен оговориться, что делать пролет в своде печи никогда не следует. Это устарелая и очень плохая система и вот почему: пламя не однородно; в нем есть холодные, тяжелые струи, в данном случае омывающие холодные слитки, и горячие, легкие струи, стремящиеся к своду. Делая пролет в своде, мы



Фиг. 25.

Продукты горения при температуре в 600° удаляются под котел через отверстие O. Количество печных газов по действительному секундному расходу каменного угля при полуторном расходе воздуха определено $Q_{600} = 8,58 \text{ м}^3/\text{сек}$. Отверстие в своде имеет площадь $\omega = 2,5 \times 0,6 \text{ м} = 1,5 \text{ м}^2$.

Вопрос: на каком расстоянии от свода находится нижнее зеркало печных газов?

$$Q = k_1 k_2 \omega \sqrt{2gH} \frac{V_{\text{воз.}} - V_{\text{печ. газ.}}}{V_{\text{печ. газ.}}}$$

Приняв $k_1 k_2 = 1$; $\sqrt{2g} = 4,43$ получим

$$8,58 = 1,5 \cdot 4,43 \sqrt{H} \frac{1,29 - 0,42}{0,42}$$

$$8,58 = 1,5 \cdot 4,43 \sqrt{H} \cdot 207.$$

$$\sqrt{H} = \frac{8,58}{1,5 \times 4,43 \times 1,44} = \frac{8,58}{9,57} = 0,896$$

$$H = 0,803 \text{ м.}$$

даем возможность горячим струям покинуть печь, холодные же, тяжелые струи облегают слитки и последние очень плохо греются.

Дым всегда надо отводить с пода печи; тогда холодные струи покидают печь, горячие же заступают их место и слитки энергично греются. Это относится к печам всяких назначений и отвод продуктов горения с уровня пода вниз — должно почитать общим правилом для правильной конструкции печи.

Уравнение (B) может быть весьма упрощено, если считать вес 1 м^3 дыма равным весу воздуха (1,29 кг), что почти верно. Тогда

$$\frac{V_{\text{воз.}} - V_{\text{печ. газ.}}}{V_{\text{печ. газ.}}} = \frac{1,29 - \frac{1,29}{1+at}}{1,29} = \frac{1 - \frac{1}{1+at}}{1} = at$$

$$\text{и } Q = k_1 k_2 \omega \sqrt{2gHat} \dots \dots \dots (C)$$

¹⁾ Особенно часто употребляются такие печи при получении меди, свинца и др. металлов.

Выражение Hat есть скоростный напор h , ибо $v = \sqrt{2gh}$, а потому

$$h = Hat \text{ или}$$

$$h : H = at,$$

а так как $a = \frac{1}{273}$, то получаем

$$h : H = t : 273 \dots \dots \dots (D)$$

скоростный напор в столько раз больше высоты H , во сколько t больше 273. Как мы увидим ниже, это выражение нам еще встретится при расчете газовых фонтанов.

Приложение теории водосливов к расчету отражательных печей.

Если мы имеем обширный водоем, через который протекает (Фиг. 26) Q м³/сек, то в нем установится уровень на высоте H от поверхности пло-



Фиг. 26.

щадки водослива, толщина же переливающегося слоя h определится из формул:

$$h = \sqrt[3]{H}; Q = 0,35 \cdot bH \cdot \sqrt{2gH}.$$

$$h = 0,5 \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2}}.$$

как все нагреваемые в печи предметы расположены на поду печи, так как под печи теряет много тепла на лучеиспускание и нагревание посаженных в печь предметов, то под хорошо работающей отражательной печи должен энергично подогреваться пламенем, что возможно только в том случае, если нижнее зеркало пламенного потока будет касаться пода печи, или если, как говорят на заводах, «пламя будет лизать подину».

Это соображение дает нам метод расчета отражательных печей. Очевидно, в хорошо работающей печи глубина обращенной газовой реки должна равняться высоте свода над подом. Если вернуться к фиг. 25, то h и будет это расстояние.

Задачу вывода формулы для глубины газовой реки блестяще разрешил И. Г. Есьман¹⁾, к которому я обратился за помощью для правильной математической формулировки этого случая.

В его работе указано, что вышеприведенная для воды формула, для газов получает такой вид:

$$h_t = A \sqrt[3]{\frac{Q_t^2}{B^2 t}}$$

где h_t — высота движущегося слоя газов, Q_t — расход газов в м³ при температуре t , B — ширина газослива.

При чем коэффициент A различен для различной высоты h_t и длины E , что видно из нижеприведенной таблицы.

Таким образом, рассчитывая какую-либо отражательную печь, мы можем смотреть на нее как

h_t	0,30					0,40					0,50				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
A	3,20	3,41	3,52	3,62	3,67	3,07	3,34	3,51	3,61	3,69	2,95	3,27	3,48	3,59	3,69
h_t	0,60					0,75					1,00				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
A	2,75	3,20	3,45	3,59	3,69	2,71	3,06	3,36	3,56	3,69	2,43	2,95	3,28	3,52	3,75

На основании этой формулы можно составить себе понятие о глубине протока, соединяющего два водоема, и о глубине всякой реки с дном, имеющим уклон, достаточный для покрытия неизбежных потерь на трение.

Всякая пламенная отражательная печь с горизонтальным сводом представляет русло обращенной реки, в котором течет не вода, а раскаленные газы.

Хорошо работающая отражательная печь должна удовлетворять нижеследующему условию: так

на газослив, глубина которого определяется по формуле И. Г. Есьмана. При движении газов по горизонтальным борозкам и по горизонтальным сводам методических печей формула эта должна дать очень близкие к практике результаты.

При сводах восстающих действительная толщина струи h будет меньше вычисленной по формуле И. Есьмана, при сводах понурых — больше вычисленной по этой формуле.

¹⁾ Журн. Рус. Мер. О-ва, 1914, I, стр. 725—770.

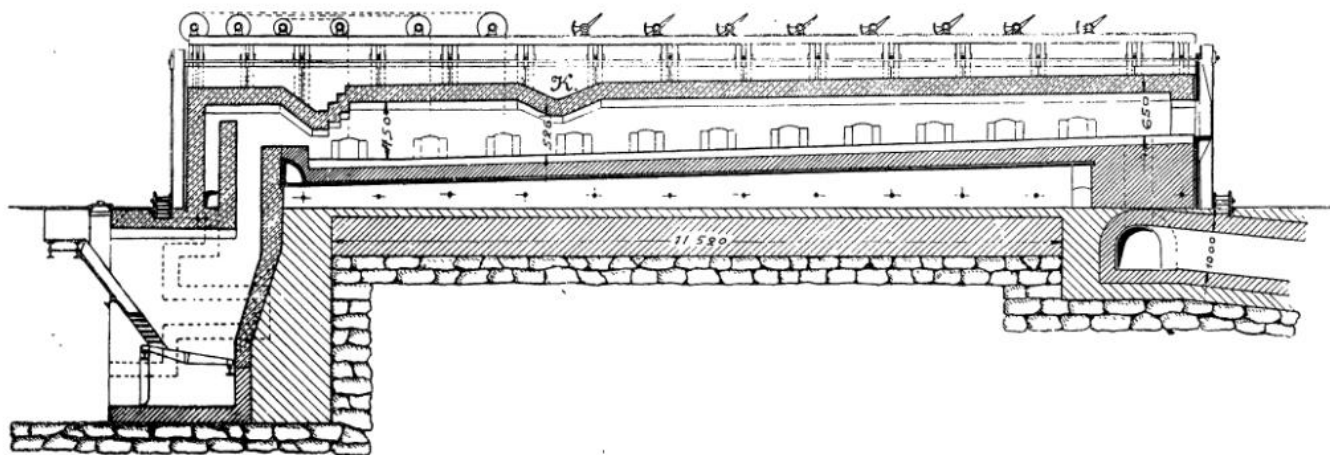
В своей работе И. Г. Есьман дает математические выражения и для первого случая, но вводить в них коэффициент трения, о котором мы пока ничего не знаем.

В какой же мере согласна практика с формулой Есьмана?

Для того, чтобы проверить формулу И. Г. Есьмана, я попробовал применять ее для действующих печей, при чем мне пришлось основываться на следующем положении: раз печь работает и завод ею довольствуется, то пламя газослива должно быть на поду печи.

Сама металлургическая печь представляет из себя весьма редко идеальный газослив¹⁾. Рассматри-

Секундное количество печных газов при 0°С	$Q_0 = 0,77 \text{ м}^3/\text{сек}$
при 1200°С	$Q_{1200} = 4,2 \text{ м}^3/\text{сек}$
Высота свода над подом в пережиге K , при $t = 1200^\circ$ по формуле И. Г. Есьмана .	$h_{1200} = 455 \text{ мм}$
Сделано	526 мм
Секундное количество газов при $t = 700^\circ$	$Q_{700} = 2,74 \text{ м}^3/\text{сек}$
Высота свода над подом у дымового пролета при $t = 700^\circ$ по формуле И. Г. Есьмана .	$h_{700} = 510 \text{ мм}$
Сделано	650 мм



Фиг. 27.

вая каждую печь, приходится искать ее командующий размер и вот тут-то и удается распутать те гордые узлы, которые ставили в тупик весьма многих инженеров. Оказывается, что во многих печах решающую роль играют размеры, которыми мы пренебрегали, и, напротив того, те размеры, которым мы придавали весьма серьезное значение, его вовсе не имеют.

Как пример расчета и его значения приведу данные расчета методической печи Лысьвенского завода (фиг. 27) работающей на каменном угле Кизелевских копей на Урале с 25% золы и свыше 3% серы. Недостатки печи и меры к улучшению ее работы определяются расчетом сами собой.

Размеры пода	$13 \times 2 = 26 \text{ м}^2$
Выделка в 24 часа	2900 пуд.
На 1 м ²	1,83 тп
Расход к. у./24 часа	$409\frac{1}{2} \text{ пуд.} = 6170 \text{ кг}$
В секунду	0,078 кг
На пуд слитков к. у.	14,1 %
При полуторном расходе воздуха на 1 кг к. у. приходится печных газов при 0°С	9,89 м ³

Таким образом мы получили, что пламя, в передней части печи, будет лизать лежащие на поду слитки. Вычисленный же размер у дымового пролета оказался меньше, чем сделано в натуре. Получив такие результаты подсчета, я запросил письмом управляющего Лысьвенским округом, А. И. Онуфровича, о работе этой печи, поставив два вопроса.

- 1) Прижимают-ли печные газы пережигом свода к поду печи?
- 2) Не отстают-ли они от пода в заднем конце печи?

На это я получил ответ, излагавший историю этой печи: печь была построена без пережиги (Жур. Рус. Мет. О-ва, 1910—I статья Н. Толстова, Таб. XXXI); работала отвратительно; тогда был сделан пережиг такого размера, чтоб прижать пламя к поду. Оказалось, что слою пламени в печи со слитками пришлось дать высоту 526 мм (черт. 27).

На второй мой вопрос я получил ответ, что задняя часть печи работает не важно. Пламя летит под сводом. В ближайший ремонт А. А. Онуфрович предполагает свод сломать и сделать его

¹⁾ Подробнее см. Ж. Р. М. О. 1925, ч. I, стр. 38.

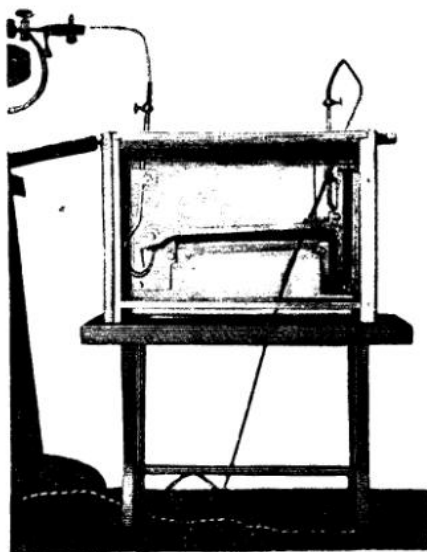
горизонтальным, при чем свод опустится на 150 мм и h_{700} будет равно—500 мм.

Итак, мы видим, что формула И. Г. Есьмана получила полное подтверждение при расчете этой печи.

Мы видим, что реакция горения идет очень неполно в непосредственном соседстве с холодными слитками, поэтому в интересах полноты горения методические печи, с одной стороны не допускают низких сводов, с другой стороны,—расход горючего в них быстро увеличивается с поднятием свода, т. к. из формулы Есьмана следует, что

$$Q_t = B \sqrt{\left(\frac{h_t}{A}\right)^3 \cdot t}$$

Кроме того, всякое увеличение скорости движения пламени в пороге, равно, как и восстающий кверху свод, уменьшая толщину пламени, увеличи-



Фиг. 28.

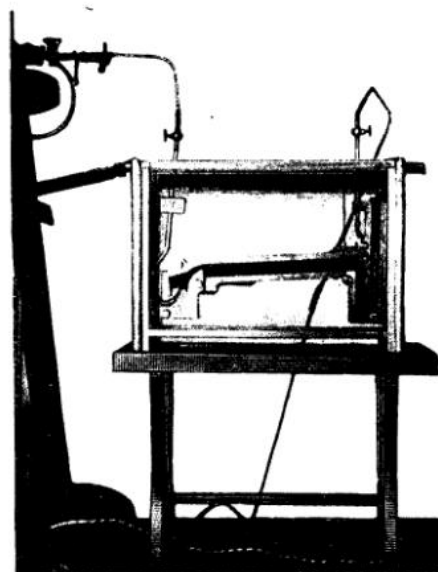
вают расход горючего, ибо в конце-концов пламя в отражательных печах должно лизать под.

Все это приводит нас к выводу, что современные методические печи не могут работать удовлетворительно.

На фиг. 28 и 29 изображена модель печи Путиловского завода, опущенная в воду, по полостям которой пущен окрашенный керосин. Обе фотографии демонстрируют отвод дыма через отверстие в поду, при чем на фиг. 28 видно, что на поду печи остается, даже при таком способе отводить дым из печи, слой холодного воздуха. Восстающая кверху подина образует мешок, из которого тяжелый холодный воздух не имеет выхода. Это — капитальнейший недостаток методических печей с восстающим сводом и подом: расположенные на поду слитки студят печные газы и остуженные печные газы не имеют возможности удалиться в дымовую трубу, ибо они тяжелее пламени.

На фиг. 29 был усилен приток керосина, но воду удалось удалить с пода модели не раньше, чем давление было поднято так сказать выше атмосферного, так что часть керосина выдавило даже под подину модели. Очевидно так работать на печи нельзя. Нельзя выдавливать остывшие на подине газы через заслонки в атмосферу. Следовательно, на практике мы имеем всегда работу печи согласно фиг. 28, при чем слитки энергично греются только сверху, на поду же лежит слой остывших печных газов и засасываемого холодного воздуха. Это задерживает их нагревание, увеличивает угар железа и делает обязательным кантование слитков.

Вопрос о рациональной конструкции методической печи решен американской печью Морган с понурым сводом (фиг. 30 и модель фиг. 31 и 32).



Фиг. 29.

Курьезно, что Морган был приведен к этой печи совсем не соображениями о движении пламени, а, просто, удобством двигать толкателем нагреваемые болванки вверх, при чем подогреваемые болванки не выскакивали из ряда, как при толкании их вниз или по горизонтальным трубам. Однако оказалось, что приданная им печам с понурым сводом, конструкция решает вопрос о методических печах наилучшим образом.

Из фиг. 30 видно, что генераторный газ высокой температуры (около 1000°) и подогретый в рекуператоре воздух вводится в сожигательную камеру; здесь происходит горение смеси, а затем печные газы по мере их охлаждения, спускаются по понурому своду, проходят между слитками, лежащими на трубах, и опускаются в трубчатый рекуператор.

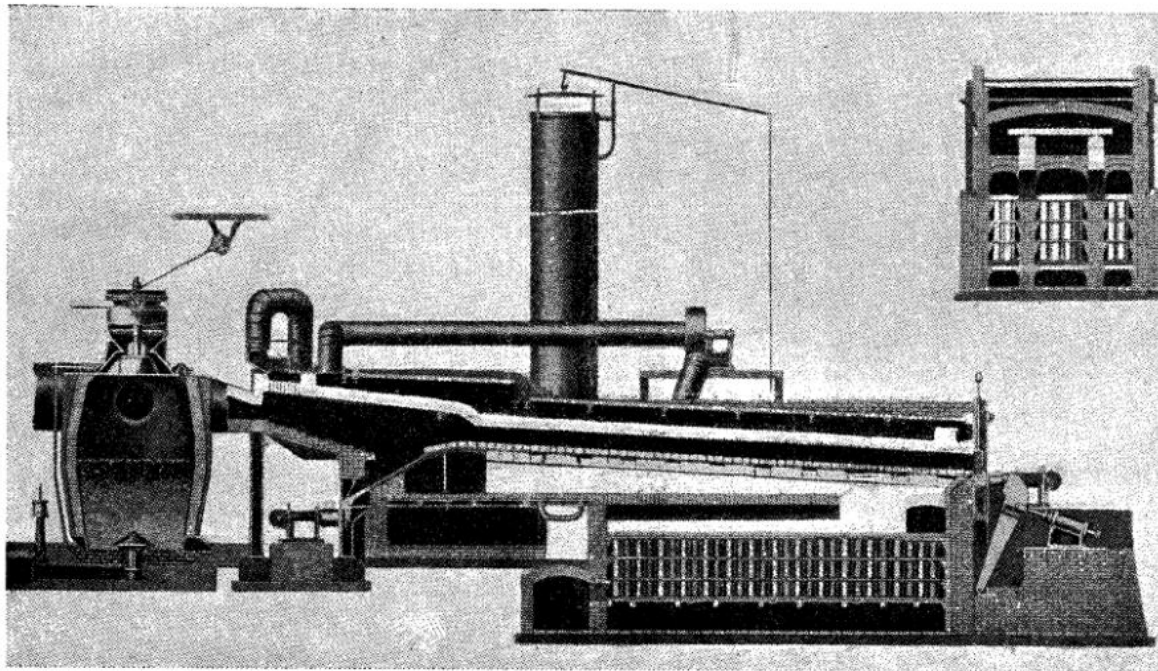
В этой печи слитки, буквально, купаются в пламени и на модели видно, что ни малейшее за-

сасывание холодного воздуха в этой печи невозможно, как невозможно и застаивание остывших печных газов. Напротив того, в этой печи остывшие струи падают на очень низко расположенный под и по нем спускаются в рекуператор. На фотографии фиг. 31 уловлен момент заполнения модели керосином; она прекрасно демонстрирует, что раскаленные газы пламени спускаются по понуруму

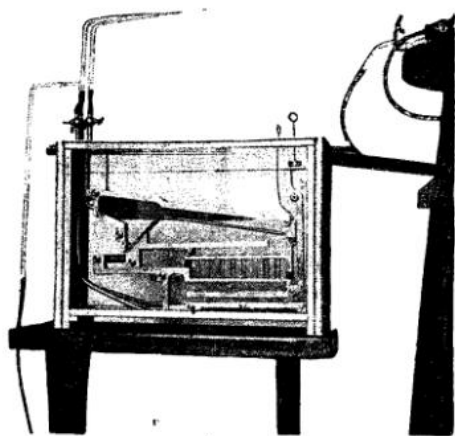
Какой свод выбрать для печи,—восстающий, горизонтальный или понурый, зависит от цели, которая преследуется печью:

1) свод горизонтальный гарантирует не очень высокую температуру в начале печи и не очень низкую в конце;

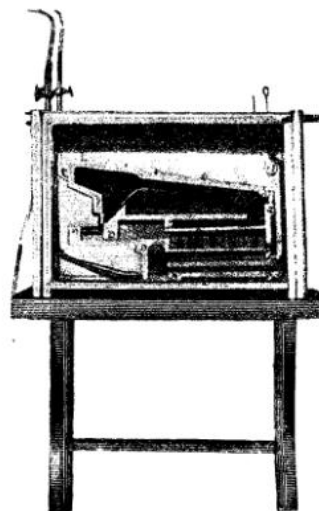
2) если мы хотим усилить жар в передней части печи и понизить в конце, мы делаем свод по-



Фиг. 30.



Фиг. 31.



Фиг. 32.

своду горизонтальными слоями и горизонтальными же слоями, омывая слитки, спускаются по мере своего охлаждения в рекуператор.

Идея делать методические печи с понурым сводом сильно распространяется по заводам и на юге России можно видеть несколько старых печей с восстающим сводом, переломанных по середине.

нурый; тогда впереди печи получается высокая камера, где пламя задерживается некоторое время; там кончаются реакции горения; горячие продукты горения по мере остывания спускаются вниз параллельными слоями вдоль свода и уходят в дымовое отверстие в поду печи;

3) однако бывают случаи, когда мы заинтересованы в том, чтобы во всей печи был бы ра-

мерный жар, тогда необходимо применить свод восстающий.

В моей личной практике был такой случай: на поду печи нагревались два больших стальных ящика для отжига жести; при чем первый нагревался гораздо скорее, чем второй, и отжиг жести в первом ящике был сильнее, чем во втором. Такая работа была для завода крайне убыточна и надо было добиться, чтобы отжиг во втором ящике не отставал бы от первого. Это было достигнуто заменой понурого свода горизонтальным. Мы тогда совершенно напрасно побоялись сделать свод восстающий, который послал бы в конец печи всю массу пламени и распределение его по печи пошло бы от заднего конца к переднему.

Нормальная скорость газосливодов.

Формула И. Г. Есьмана дает нам возможность определить нормальную скорость v пламени, в зависимости от его толщины.

$$\text{Имеем } h = A \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 t}} \quad \text{или} \quad Q = B \sqrt[3]{\frac{h^3 t}{A^3}}$$

$$\text{Но } Q = \omega \cdot v = B \cdot h \cdot v$$

где ω площадь сечения, B — ширина, h — высота газослива.

$$\text{Откуда} \quad Bhv = B \sqrt[3]{\frac{h^3 t}{A^3}}$$

$$v = \sqrt[3]{\frac{ht}{A^3}}$$

При ширине печи 2 м для скорости v имеем:

t°	$h_t = 0,3 \text{ м}$		$h_t = 1 \text{ м}$	
	$E=0,5 \text{ м};$ $A=3,20$	$E=\infty;$ $A=3,67$	$E=0,5 \text{ м};$ $A=2,43$	$E=\infty;$ $A=3,70$
600	2,34	1,91	6,47	3,43
800	2,71	2,20	7,47	3,96
1000	3,02	2,46	8,34	4,42
1200	3,31	2,70	9,13	4,84
1400	3,58	2,91	9,87	5,24
1600	3,83	3,12	10,56	5,60

Из этого мы видим, что при горизонтальном своде скорости пламени колеблются обыкновенно в пределах до $5\frac{1}{2}$ м/сек, а так как в пламенных печах пламя должно оставаться некоторое время, чтобы успеть сообщить свою теплоту нагреваемым предметам, то техника очень часто бывает заинтересована сколь возможно замедлить движение пламени; но очевидно, что мы никогда не можем

желать ускорить движение пламени, так как это повело бы к безмерному удлинению печи.

Я делал много попыток определить время, необходимое для передачи тепла газам нагреваемым предметам и стенкам печи. Мои подсчеты установили мне два предела для потери температуры в секунду. Метод расчета таков: я сосчитывая теоретическую температуру пламени, вычитаю температуру печных газов, покидающих рабочее пространство печи, делю разность на время пребывания газов в рабочем пространстве и получаю падение температуры в секунду.

Для мартеновских печей оно $250-350^\circ\text{C}$ для больших круглых кирпичеобжигательных печей с обращенной тягой $-70-80^\circ\text{C}$ в секунду.

Таким образом, считая, что температура горения каменного угля при $1\frac{1}{2}$ расходе воздуха будет 1600°C , а температура дыма 700°C , мы получим, что газы должны остыть в рабочем пространстве на 900° , т.е. должны пребывать в нем не менее 4–5 секунд.

Если это будет тип обыкновенной методической печи для подогрева слитков, где нижнее зеркало потока касается пода печи, то принимая $E = \infty$, скорость пламени в начале печи будет при высоте ее 0,75 м — 4,39 м/сек ($t = 1300^\circ$), а в конце 2,96 м/сек ($t = 600^\circ$), а в среднем $\frac{4,39 + 2,96}{2} = 3,68$ м/сек, что дает длину печи в $15-18\frac{1}{2}$ метра.

Итак, ограничиваясь возможно малыми скоростями потоков пламени, мы приходим к очень длинным печам.

Отсюда ясно все неудобство старой системы пламенных печей с узким пламенным окном и чрезмерным увеличением скорости над порогом печи. Такое средство смешивать между собой элементы пламени должно быть оставлено. Тесное смешение вторичного воздуха и полугенераторного газа необходимо, но в пороге ему не место.

Высота пламенного окна над порогом должна делаться сообразуясь с формулой:—

$$h_t = A \sqrt[3]{\frac{Q_t^2}{B^2 t}}$$

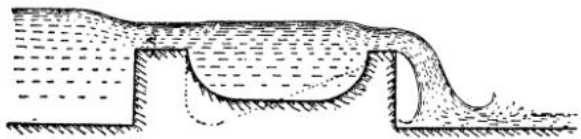
Пламенные печи, основанные на идее газосливодов с подпрудой.

Весьма часто печи большой длины неудобны. Между тем есть желание удержать пламя в печи подольше, уменьшив скорость поступательного движения газов. В этих случаях газослив подпруживают так же, как подпруживают водослив.

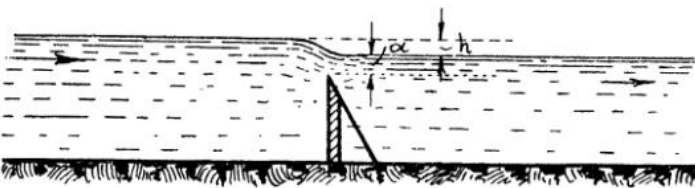
Если мы имеем подпруженный водослив, то очевидно скорость в подпруде будет меньше скорости в водосливе. Следовательно, устроив подпруду, мы уменьшим скорость воды.

Сделаем для пламени то же, что мы сделали для воды.

На фиг. 26 мы имели водослив с горизонтальной площадкой. На фиг. 33 имеем водослив с углублением.

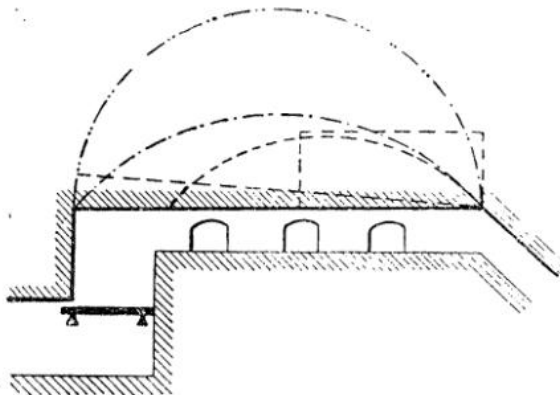


Фиг. 33.

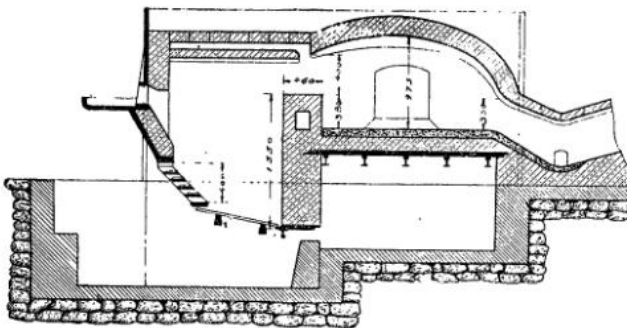


Фиг. 34.

Сравнивая фиг. 26 и 33 мы видим, что преобразование водослива с площадкой в водослив с углублением произошло, когда мы порог водослива оставили на месте, и на поверхности водослива сделали углубление. Если мы будем увеличивать это углубление, то получим подпруженный водо-



Фиг. 35.

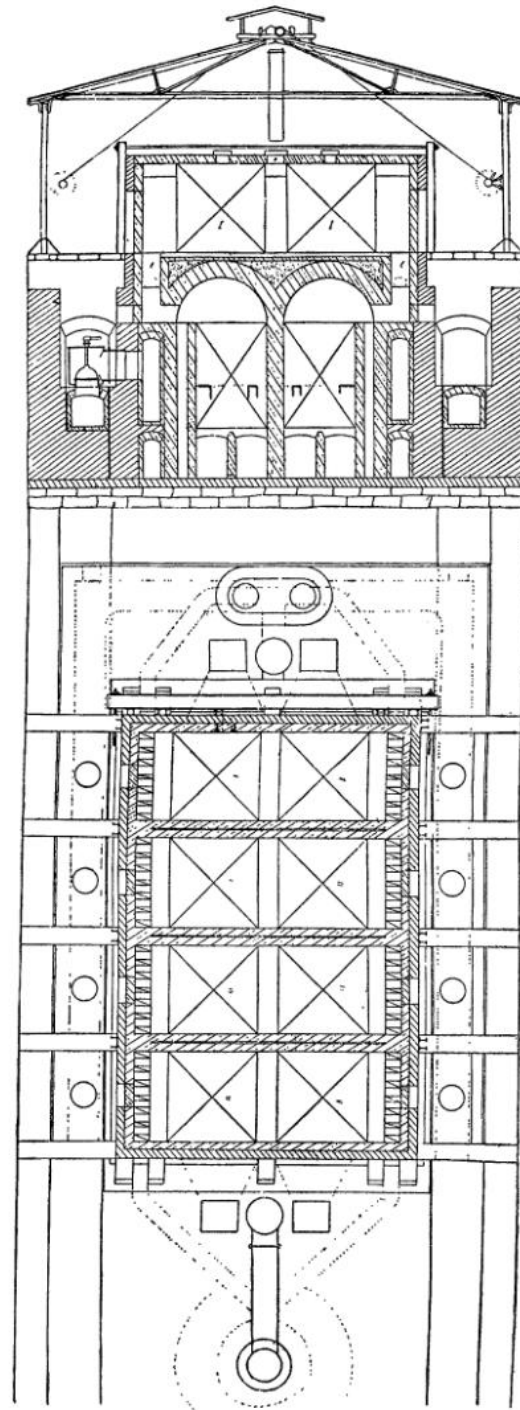


Фиг. 36.

слив (фиг. 34) в котором уровни жидкости остались почти те же, что и в водосливе фиг. 26.

Если мы сделаем то же с печью (фиг. 35) и изменим свод по всем шести вариантам, то уровень зеркала потока останется на подине и печь будет

продолжать хорошо работать. Газы будут пребывать в печи большее время и лучше отдавать свою теплоту нагреваемым предметам, а температура газов, покидающих печь, а, следовательно, и температура нагреваемых предметов, будет различна.



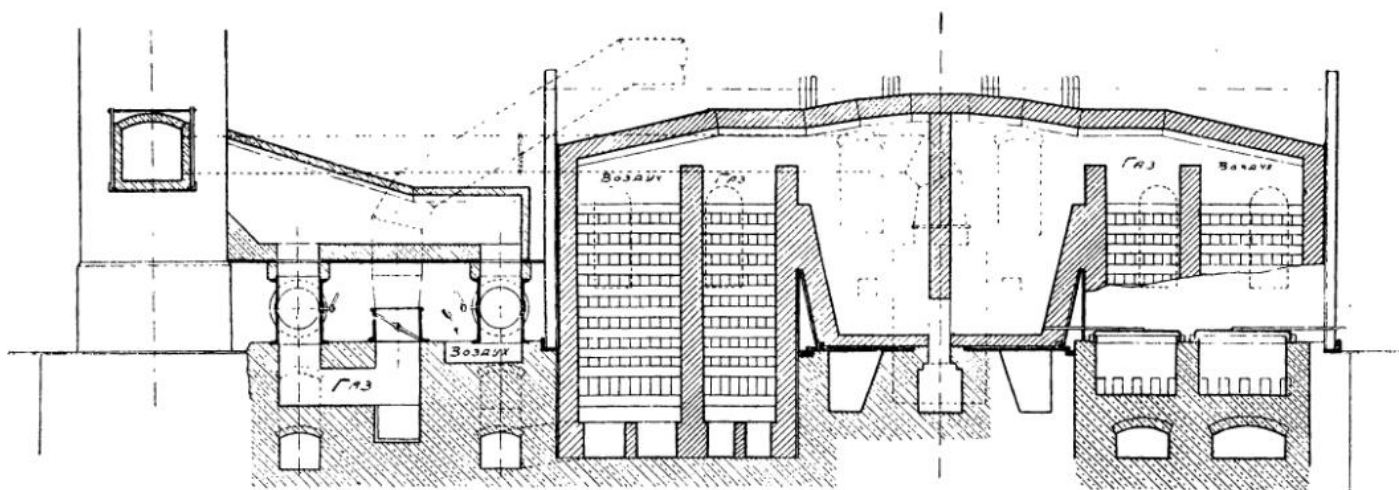
Фиг. 37.

Таким образом нетрудно перейти от типа методической печи к типу камерной печи. На фиг. 36 изображен переходный тип от обыкновенной печи для нагрева слитков к камерной печи. Это—печь для нагрева поковок Путиловского завода. Очень короткая печь с высоким сводом, дабы иметь возможность вводить крупные слитки. Фиг. 37 изо-

бражает рабочее пространство печи автора для обжига динаса. Это — конструктивно разработанный чертеж печи, описанной в Журн. Русс. Мет. О-ва (1910, 86—89).

В этой многокамерной печи системы Сименса газ и воздух входят и уходят на уровне пода печи, горячие продукты горения поднимаются к своду, а остывающие спускаются к поду и уходят через пролеты в регенераторы. Печь всегда полна огня и на поду ее всегда пламя. К этому же типу относятся и кирпичеобжигательные печи типа фиг. 4.

Как видит читатель, от чистого типа газосливных методических печей для подогрева слитков мы постепенно перешли к камерным печам с обращенной тягой.

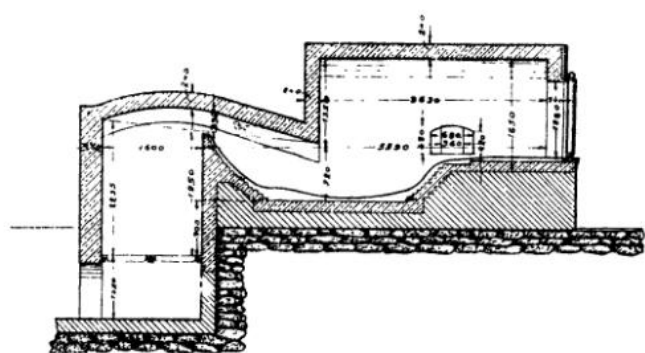


Фиг. 38.

высота верхней кромки дымового канала должна быть не выше h_p , а нижняя кромка должна быть на уровне пода печи. Если в камерной печи взять дым выше уровня пода, то на поду никогда высокой температуры достигнуто не будет.

Как иллюстрацию попытки создать удовлетворительную печь, нарушив это условие, могу привести чертеж печи для обжига динаса системы Сименса (фиг. 38). Для того, чтобы заставить пламя обжечь динас на поду печи, изобретатель устроил в печи перегородку и, все-таки, динас на поду печи обжигался плохо. Тогда он создал дополнительный дымовой пролет.

Сравним эту печь с печью для обжига динаса фиг. 37—как проста и логична конструкция фиг. 37 сравнительно с фиг. 38!



Фиг. 39.

Печи эти рассчитываются по времени пребывания в них газов, задаваясь падением температуры печных газов в секунду. Но, конструируя эту печь, надо иметь всегда в уме формулу И. Есьмана для газослива и ею руководствоваться во всех тех случаях, когда движущийся объем печных газов может получить форму газослива.

Например, если в печи мы имеем окна и заслонки, то высота окон не может превышать высоты h_p ; если борозок взять не вниз, а в бок, то

Очень интересный тип печей представляет отражательная печь для переплавки чугуна Лысьвенского завода американского типа, построенная А. И. Онуфриевичем (фиг. 39). Конец обыкновенной отражательной печи обращен в камеру, при чем дымовой бороз оставлен на своем старом месте.

Печь эта рассчитывается на основании следующих соображений.

В $13\frac{1}{2}$ часов сжигается ею $4\frac{1}{2}$ куб. саж. дров, что составит расход $0,31$ кг/сек дров. Принимая расход воздуха $1,4$ против теоретического, $t=1300^\circ\text{C}$, получим количество печных газов $Q_0=1,82$ м³/сек, $Q_{1300}=10,48$ м³/сек. При ширине печи $1,6$ м получим $h_{1300}=1,19$ метр.

Следовательно, нормальная глубина газослива этой печи равна 1200 мм и, чтобы эта печь могла работать расстояние от пода до верхней кромки дымового пролета должно быть не больше 1200 мм, иначе на подине не будет пламени и под не прогреется. Действительный вертикальный размер от выпускного отверстия до верхней кромки дымового

пролета сделанный 1100 мм, хорошо сходится с расчетом. Садочное окно гораздо выше, но во время работы печи его плотно замазывают, а потому потери пламени через него не происходит.

Объем рабочего пространства этой печи около 11 м³, при чем на долю камеры приходится 8,7 м³. Благодаря камере, пребывание газов в рабочем пространстве печи более секунды, чего не было бы, если бы печь не заканчивалась камерой.

Одним из интереснейших типов печей являются печи кровельного производства. Требование, предъявляемое к обыкновенным печам, чтобы пламя было бы на подду печи, для кровельных печей усугубляется непосредственным вредом воздуха на подду печей кровельного производства. Если на подду такой печи будет воздух, то железо будет окисляться и даст массу брака. Поэтому все эти печи должны строиться так, чтобы исключить всякую возможность появления на подду свободного воздуха.

Печи эти по типу камерные и высота свода над подом может быть очень большая. Наилучшие печи делаются с высоким сводом, при чем подвальным пространством пользуются как сожигательной камерой, для теснейшего смешения газа и воздуха и возможности сжигать газ при теоретическом количестве воздуха.

Где же критический размер этих печей? Отчего зависит хорошая и дурная их работа?

Печи эти работают или при открытых, или при часто открываемых заслонках. Высота садочного окна и есть тот критический размер, от которого зависит хорошая работа печи. Эта высота должна быть ниже высоты h_p , определяемой по формуле И. Есьмана.

Листокатальной печью, на подине которой нет воздуха и которая, поэтому, удачно решала вопрос об утилизации теряющегося жара печей кровельного производства под паровыми котлами, является печь Юго-Камского завода.

Данные для ее расчета таковы:

Расход дров в 24 ч. на семь очелков . 4,2 саж³.
 Секундный расход на очелок 0,023 кг.

Секундный расход газов при теоретическом горении:

$$Q_0 = 0,023 \times 4,41 = 0,101 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

$$Q_{1000} = 0,471 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Ширина окна 0,85 мм.

Вычисленная высота окна $h_{1000} = 0,250$ м; сделано—225 мм.

Отсюда мы видим, что высота окна, прикрываемого заслонкой, строго пропорционирована с количеством газов, циркулирующим в очелке, а потому открытие заслонки (заслонка прекрасной конструкции, с педалью) не влечет за собой втор-

жения в очелок холодного воздуха, что имеет место, повидимому, во всех печах других систем, например в газовых печах Алапаевского типа, данные для которых следующие:

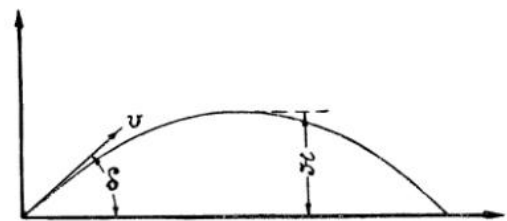
Секундный расход дров на очелок . . . 0,0185 кг.
 Количество печных газов при 0°C . $Q_0 = 0,082$ м³.
 Количество печных газов при 1000°C. $Q_{1000} = 0,382$ м³.
 Высота газослива из-под заслонки . . $h_{1000} = 0,2$ м.

Между тем высота садочного окна сделана 450 мм. Вот почему на подду листокатальных печей Алапаевского типа всегда слой воздуха и в дыме их, согласно работе Н. А сеева, находится 3,85% CO₂ и 16,65% O₂. Благодаря этой же причине, печи эти бросаются в Алапаевске.

Зависимость работы листокатальных печей от высоты заслонки садочного окна является полной неожиданностью, даже для автора: однако, это должно быть так. Я нисколько не сомневаюсь в том, что это один из весьма многих сюрпризов в познании печей, которые готовит нам гидравлическая теория.

Приложение к пламени теории гидравлических фонтанов.

Если мы пренебрежем сопротивлением трения в насадке и в воздухе, то для воды высота вертикального фонтана равна напору и $H = \frac{v^2}{2g}$. Наклонный фонтан описывает параболу, высшая точка



Фиг. 40.

которой имеет ординату (фиг. 40).

$$H = \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g}$$

В приложении к пламени, т.-е. легкой жидкости, движущейся в тяжелой, нам придется обратить этот чертеж вниз, так как на брошенную частицу действует не сила тяжести, направленная вниз, а разность весов брошенной частицы и соответствующего объема среды, в которой эта частица движется. Сила эта будет направлена вверх и весь чертеж нужно обратить на 180° (фиг. 41).

И. Г. Есьман дал нижеследующее выражение для высоты фонтана, в виде бесконечно тонкой струйки газов, выбрасываемых из пролета марте-новской печи.

Назовем начальную скорость движущейся жидкости — v ;

вес единицы объема движущейся жидкости — Δ_d ;

вес единицы объема неподвижной среды — Δ_n .

Тогда каждая единица объема движущейся жидкости теряет в своем весе Δ_n ; а сила, поднимающая единицу объема равна $(\Delta_n - \Delta_d)$.

Ускорение этой силы x найдется из пропорции

$$x : g = (\Delta_n - \Delta_d) : \Delta_d.$$

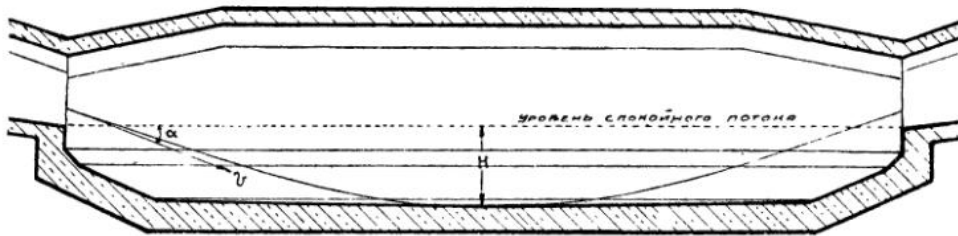
А высота H для этого случая

$$H = k \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \left(\frac{\Delta_d}{\Delta_n - \Delta_d} \right)$$

Для раскаленных газов:

$$\Delta_n = \frac{\Delta_0}{1 + \alpha t_n}$$

$$\Delta_d = \frac{\Delta_0}{1 + \alpha t_d}$$



Фиг. 41.

откуда:

$$H = k \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \cdot \frac{\frac{\Delta_0}{1 + \alpha t_d}}{\frac{\Delta_0}{1 + \alpha t_n} - \frac{\Delta_0}{1 + \alpha t_d}} = k \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \cdot \frac{1 + \alpha t_n}{\alpha(t_d - t_n)}$$

$$H = k \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \cdot \frac{1 + t_n}{t_d - t_n} = k \cdot \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \cdot \frac{273 + t_n}{t_d - t_n}$$

где k — коэффициент учитывающий влияние вихрей = 0,7¹⁾.

При вертикальном фонтане, когда $\alpha = 90^\circ$, получим:

$$H = k \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_n}{t_d - t_n}$$

При $t_n = 0^\circ$, т.е., когда фонтан бьет в холодный воздух, получим:

$$H = k \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{273}{t_d}$$

или пренебрегая вихрями

$$H : h = 273 : t_d.$$

Пропорция, которую мы уже имели на стр. 18.

Сделаем приложение теории фонтанов к мартеновским печам.

На фиг. 23 показана модель мартеновской печи, в полостях коей движется керосин. Как видно из фиг. 23, все полости мартеновской печи заполнены керосином, кроме ванны печи; в ванне печи,

вернее во всем пространстве печи ниже кромок газовых пролетов, остается вода, которая никоим образом из полости мартеновской печи удалена быть не может.

Присутствие воды ясно указывает нам на капитальнейший недостаток мартеновской печи, как прибора для нагревания: в ней пламя входит и уходит под сводом, и вся часть рабочего пространства от нижней кромки газового пролета до уровня выпускного отверстия, расстояние, равное в современных печах от 0,5 м до 1,3 м, остается вне газового потока.

На модели мы ясно видим, что ванна мартеновской печи является мешком, из которого остывшие газы не имеют естественного выхода и потому должны застаиваться.

Для того, чтобы сбить их с пода, смешать с раскаленными газами пламени, газ и воздух, по-

ступающие в рабочее пространство мартеновской печи, направляют на под. Им дают большую скорость, около 12—18 м/сек в европейских и до 50 м/сек (на дутье) в американских печах, и, пользуясь явлением фонтана, опускают их на всю глубину лещади до выпускного отверстия включительно.

Если выражение для газового фонтана верно, то все печи Мартена, работающие в заводах, должны ему удовлетворять.

Посмотрим, так ли это?

В рабочее пространство мартеновской печи вводится нагретый до 1000° — 1100°C воздух и газ

Соединяясь между собой, они дают факел пламени, имеющий по пирометру Ваннера 1800 — 1850°C , вместо теоретической температуры 2100°C . Зная количество топлива, сжигаемого в 1 секунду в генераторный газ, его состав, не трудно вычислить секундный объем генераторного газа и вторичного воздуха, а следовательно, — не трудно вычислить и скорости горячего воздуха и газа, с которыми они вводятся в полость печи.

Например, 30-ти мартеновская печь, делая четыре плавки при затрате каменного угля в 25% от веса металла, расходует 0,347 кг к.у./сек, чему соответствует при 0°C $1,50 \text{ м}^3/\text{сек}$ генераторного газа (см. часть I) и вторичного воздуха (при полутонном расходе) $2,67 \text{ м}^3/\text{сек}$.

¹⁾ См Ж. Р. М. О. 1913, I, 709. Статья В. Слесарева.

Приняв температуры газа и воздуха в 1000°, получим секундные объемы их, вступающие в полость мартеновской 30-ти тонной печи: газа — 6,99 м³/сек, воздуха — 12,44 м³/сек.

Газ и воздух в полости печи соединяются и дают струйку пламени, температурой 1850°. Вопрос: на какую глубину опустится эта струйка, если газ и воздух вступили в полость печи со скоростями $v_{газ}$ и $v_{воздух}$, под углами α и β к горизонту.

Работа мартеновской печи возможна только в том случае, если ее под хорошо проварен. Если под не проварен, то его срывает и плавка не будет прогрета.

Следовательно, высота фонтана H должна быть непременно больше высоты от порога газового окна до выпускного отверстия.

Эта высота дана М. А. Павловым для 36 лучших европейских и американских печей (Ж. Р. Мет. О-ва, 1910, 169—183) в пределах от 500 мм до 1375 мм.

Затем, обращаясь к формуле (стр. 26).

$$H = k \cdot \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g} \cdot \frac{273 + t_n}{t_0 - t_n}$$

мы видим, что высота фонтана тем больше, чем больше t_n , т. е. температура рабочего пространства мартеновской печи. Ясно, что когда печь будет холодной и $t_n = 0$, то H будет минимум; когда t_n сделается равной t_0 , то H делается равным бесконечности; это обозначает, что если мы имеем жидкость и в ней частицу, которой сообщена скорость и если мы не примем во внимание явление межчастичного трения, то мы должны будем прийти к выводу, что перемещение H этой частицы будет бесконечно большим и движение будет продолжаться бесконечно долгое время.

Если температура полости мартеновской печи t_n не равна нулю и не равна температуре пламени t_0 , то высота фонтана H будет тем больше, чем температура t_n выше, т. е. чем печные газы, выполняющие печь, более легки.

И в самом деле, если мы имеем струю керосина, направленную вниз, то в воде она опустится на большую глубину, чем в ртути. В печи, выполненной раскаленными газами, пламя опустится ниже, чем, в печи, выполненной холодным тяжелым атмосферным воздухом.

Каждый, кто наблюдал процесс разогревания мартеновской печи, знает, что пламя вначале в холодной печи идет под сводом, опускаясь на под все ниже и ниже по мере разогревания печи; в раскаленной печи возможна уже наварка пода, т. е. спекание кварцевого песку с небольшой примесью огнеупорной глины, магнезита с небольшой при-

месью мартеновского шлака или доломита, имеющего в своем составе 3—7% кремнезема. Такое спекание идет при температуре 1600—1700°C и возможно только тогда, когда пламя лижет под печи. Кроме того по мере работы площади газовых и воздушных окон, вследствие разгара, увеличиваются благодаря чему сильно уменьшается скорость газа и воздуха и наварка пода становится затруднительной.

Для наварки пода нужно, чтобы пламя, направляемое наклонными пролетами, могло касаться самой низкой его точки. Отсюда вытекает необходимость прежде всего выяснить, на какую глубину ниже нормального уровня газового потока нужно опустить струю раскаленных продуктов горения.

Высота газового потока определяется по формуле И. Г. Есьмана.

$$h_t = A \sqrt[3]{\frac{Q_t^2}{B^2 t}}$$

где Q_t — объем продуктов горения в м³ при температуре t ,

B — ширина газослива в м,

t — температура.

В качестве средней температуры продуктов горения мартеновской печи можно принять 1700°C. Для примера рассчитаем, при какой температуре t_n рабочего пространства мартеновской печи струйка пламени температурой 1850°C коснется пода.

Берем три 30-тонных мартеновских печи¹⁾ №№ 19, 21 и 22, для которых, как вычислено выше:

расход газа при 1000°C равен 6,99 м³/сек,

„ воздуха „ 1000°C „ 12,44 „

и количество прод. гор. при 1700°C равно

$$11,12 \times 0,347 \times \left(1 + \frac{1700}{273}\right) = 27,90 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

№№ печей.	Ширина бокового пространства (метр.).	Высота свода над подом (метр.).	Площадь газовых пролетов (м ²).	Площадь воздушн. пролетов. (м ²).	Уклон лежачих газосводов пролетов.	Уклон свода воздушн. пролетов.
19	3,3	2,980	0,285	0,540	15°	38°
21	3,6	2,200(?)	0,446	0,720	33°	33°
22	3,2	2,000	0,260	0,560	10°	38°

Кроме печи № 21 струи газа и воздуха имеют разные уклоны при различных массах (весах) газа и воздуха. Нам нужно получить общую скорость струйки пламени и ее уклон. Решим эту задачу так. Построим параллелограм количеств движения движущихся газа и воздуха и найдем вели-

¹⁾ См. М. А. Павлов. Определение размеров мартеновских печей по эмпирическим данным (1912 г.).

чину скорости и уклон смеси. Примем вес смеси за единицу и вычислим относительные веса газа и воздуха, вошедшие в состав смеси:

$$\frac{1,50 \times 1,05}{2,67 \times 1,29} = \frac{1,575}{3,444} = \frac{0,3138}{0,6862}$$

Далее, для печи № 19:

скорость газа:

$$6,99 : 0,285 = 24,5 \text{ м/сек,}$$

скорость воздуха:

$$12,44 : 0,540 = 23,0 \text{ м/сек.}$$

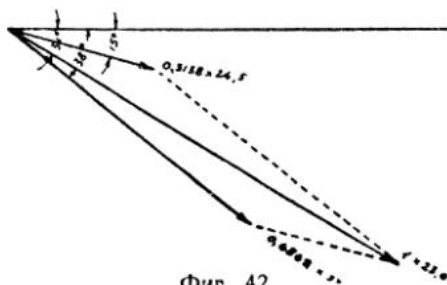
Строим параллелограмм количеств движения (фиг. 42) и находим скорость смеси равной— 23,0 м/сек.

Нормальный уровень газового потока в мартеновской печи согласно формуле Есьмана:

$$h = A \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 t}} = 3,70 \sqrt[3]{\frac{27,90^2}{3,3^2 \times 1700}} \approx 1,30 \text{ м.}$$

Пламя необходимо опустить на глубину

$$2,280 - 1,300 = 0,98 \text{ или около } 1 \text{ м.}$$



Фиг. 42.

Формулой, связывающей высоту газового фонтана со скоростью и температурой неподвижной среды является выражение:

$$H = k \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \frac{273 + t_n}{t_d - t_n}$$

Зная H , v и $\alpha = 31^\circ$, определим t_n

$$1,00 = 0,7 \frac{23,0^2 \sin^2 31^\circ}{2g} \frac{273 + t_n}{1850 - t_n}$$

Решая это уравнение, находим необходимую температуру газов, выполняющих мартеновскую печь для начала наварки пода t_n равной 81°C

Аналогично для печей №№ 21 и 22.

	№ 21.	№ 22.
Скорость газа	15,7 м/сек	26,9 м/сек
" воздуха	17,3 " "	22,2 " "
" смеси	16,8 " "	23,0 " "
Глубина погружения газового фонтана	1,00 м	0,70 м
Уклон газового фонтана	33°	28°
Температура мартеновской печи, необходимая для начала наварки пода	260°С	30°С

Какое значение имеет плотность среды, куда бьет газовый фонтан, видно из следующего примера:

Для печи № 19 высота H при $t_n = 81^\circ\text{C}$ равна 1,00 м. Определим, какова будет высота фонтана при $t_n = 0^\circ\text{C}$.

Получим:

$$H = 0,7 \frac{23,0^2 \sin^2 31^\circ}{2g} \frac{273 + 0}{1850 + 0} = 0,740 \text{ м,}$$

т.-е. пламя не коснется пода на

$$1,000 - 0,740 = 260 \text{ мм}$$

и пойдет выше пода почти на фут.

Итак, во взятых на удачу, трех 30-тонных печах, газу и воздуху в головках даны такие скорости и такие уклоны, что пламя стелется по поду при весьма слабом подогреве печи. Это, конечно, обеспечивает прекрасную починку пода, но во время работы печи не очень выгодно. Когда печь наполнена сталью и шлаком, то круто направлять пламя на ванну невыгодно: происходит удар струи о поверхность ванны, при чем пламя отражается к своду, что вредно для печи и для нагрева ванны.

Меня очень интересовал вопрос о движении пламени в длинных печах американских заводов, головки которых имеют весьма небольшие уклоны пролетов, малые скорости воздуха и большие скорости газа.

Возьмем две 60-тонные печи из таблиц проф. М. А. Павлова - №№ 34 и 36.

Расход воздуха по предыдущему примем

при 1000°C 24,88 м³/сек

Расход газа 13,98 "

Количество продуктов горения при 1700°C — 55,80 м³/сек.

	№ 34.	№ 36.
Ширина рабочего простран.	4,88 м	5,10 м
Высота свода над подом . . .	2,53 "	2,69 "
Площадь газового пролета . .	0,730 м ²	0,3935 м ²
" воздушного "	2,700 "	3 750 "
Уклон газовых пролетов	6°	12°
" воздушных "	17°	26°
Нормальная высота газового потока	1,58 м	1,53 м
Глубина погружения газового фонтана	0,95 "	1,16 "
Скорость газа	19,2 м/сек	36,5 м/сек
" воздуха	9,2 "	6,6 "
" смеси	12,3 "	15,6 "
Угол наклона газового фонтана	11°	16°
Температура печи, необходимая для наварки пода . .	1490°С	1080°С

Из этого расчета следует, что наварка пода в печи № 34 будет затруднительна, и едва ли опубликованный чертеж верен.

Что касается печи № 36, то, как мне кажется, она отвечает всем предъявленным к ней требованиям. Наварка пода не очень трудная и пламя не отражается от поверхности ванны.

ГЛАВА II.

Основы правильной конструкции печей.

Задача построения печи решена, если в полости рабочего пространства температура распределена согласно потребности производства.

Топочные газы входят в рабочее пространство с неполне законченными реакциями горения. Поэтому первая задача проекта печи заключается в том, чтобы дать реакциям горения возможность завершиться в рабочем пространстве печи, сосредоточить в нем фокус горения и наивысшую температуру пламени. Впрочем, иногда, по условиям производства, требуется предотвратить получение такого фокуса горения и, напротив того, возбудить горение во всей полости печи.

Вторая задача проекта печи—нагреть полученными раскаленными газами предметы, введенные в полость рабочего пространства.

О том, как решается первая задача мы уже имели суждение, теперь я займусь решением второй задачи: какое направление должно быть дано пламени, чтобы оно могло бы наисовершеннейшим способом омыть нагреваемые предметы и удалиться из рабочего пространства, освобождая место свежему притоку печных газов? Как приспособить к такому движению пламени рабочее пространство?

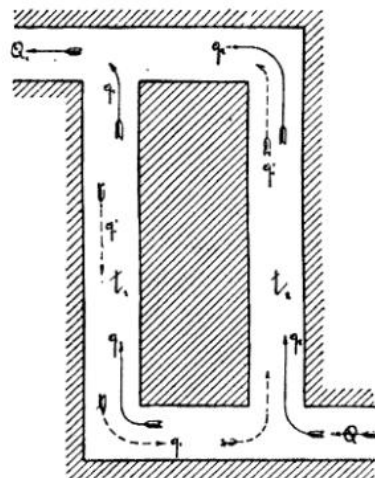
Решение этой второй задачи весьма просто. Однако, несмотря на его простоту, оно очень плохо усвоено практиками и мне придется дать читателю целую коллекцию действовавших и действующих печей с грубыми нарушениями законов природы, т.-е. коллекцию печей-уродов.

О делении потоков горячих газов.

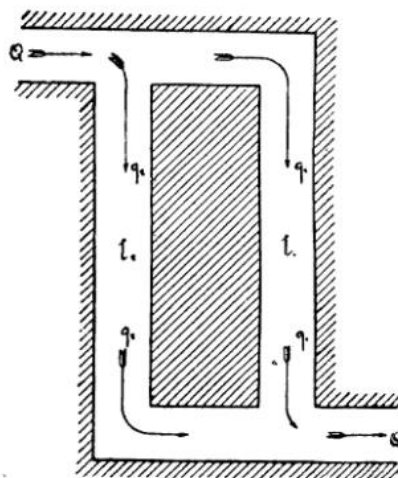
Дан поток горячих, но остывающих газов Q (Фиг. 43 и 44), требуется разделить его на две вертикальных восстающих равных струи q_1 и q_2 . Допустим, что на фиг. 43 нам удалось это сделать и поток Q разделился на две струи q_1 и q_2 с температурами t_1 и t_2 , при чем $q_1 = q_2$ и $t_1 = t_2$. Но вот, при действии этой системы, оказалось, что лучеиспускание ветви q_1 стало несколько большим, чем q_2 , и t_1 сделалось меньшим t_2 на самую малую величину Δt .

Раз температура $t_1 < t_2$, то вес столба газов q_1 окажется больше, чем q_2 , а потому и скорость потока q_1 окажется меньше, чем скорость потока q_2 . Уменьшение скорости потока q_1 еще более понизит температуру t_1 ; скорость потока q_1 еще уменьшится, температура еще понизится. В то же время скорость потока q_2 увеличится, температура газов

его повысится, отчего он еще усилится и, в конце концов, может случиться так, что поток q_1 остановится совсем, а по ветви q_2 пойдут все газы потока Q . Но возможен и такой случай, что в колене q_1 поток примет направление обратное q_1 , означенное пунктирной стрелкой. Из сказанного



Фиг. 43.



Фиг. 44.

ясно, что остывающий поток горячих газов нельзя разделить на равные восстающие струи.

Применим те же рассуждения к фиг. 44. Сделаем попытку разделить поток горячих газов Q на равные нисходящие струи. Такая попытка увенчается полным успехом. Действительно, допустим, что температура одной из струй, например q_1 понизилась. Тогда столб газов q_1 делается тяжелее и скорость его движения вниз увеличится. Он

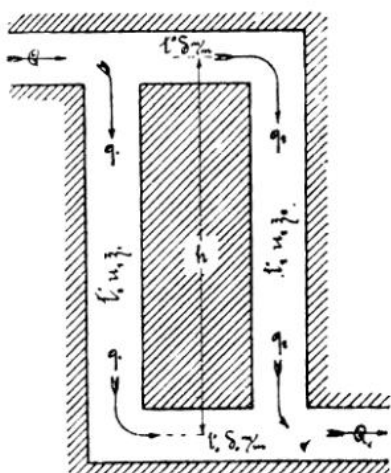
сделается сильнее, чем поток q_2 и температура его поднимется и выравняется с температурой потока q_2 . Отсюда мы видим, что задача разделения остывающего потока на нисходящие струи решается очень просто, при чем нисходящие струи имеют свойство стремиться к уравнению своей температуры.

Итак, если мы должны разделить поток горячих остывающих газов на равные части, то струям этого потока должно придать направление вниз; иначе говоря, остывающий поток делится равномерно на нисходящие струи¹⁾.

При проектировании печей иногда приходится делить поток нагревающегося воздуха. Например, в аппаратах Каупера, регенераторах, рекуператорах и проч.

Решим задачу о делении холодных, нагревающихся потоков. На фиг. 46 и 47 изображен поток холодного воздуха, движущегося по каналам в нагретых стенках. Допустим, что он делится нами на равные нисходящие струи q_1 и q_2 (фиг. 46), имеющие равные температуры t_1 и t_2 , но одна из ветвей чуть-чуть отстала в нагревании и t_1 сделалось немного меньше t_2 . Тогда столб q_1 сделается тяжелее столба q_2 и поток q_1 начнет работать энергичнее, скорость его увеличится, t_1 сделается заметно меньше t_2 ; поток q_1 сделается еще более

¹⁾ Однако бывают случаи, что сопротивление трению ветвей потока не одинаково; или что одна ветвь потока теряет много тепла на лучеиспускание; как делится поток в этом случае?



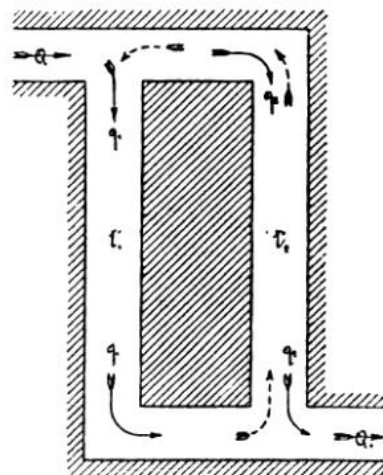
Фиг. 45.

На фиг. 45 имеем такой случай. Поток разделился на две ветви q_1 и q_2 , которые имеют разные средние температуры, разные средние скорости и разные потери на трение ξ_1 и ξ_2 , выраженные в мм водяного столба

Однако необходимым условием равновесия в этом случае должно быть одинаковое приращение гидростатического давления в обоих ветвях q_1 и q_2 .

Если бы не было затраты гидростатического давления на возбуждение скоростей u_1 и u_2 и на сопротивления

холодным, а поток q_2 еще более горячим и, в конце концов, весь поток устремится по ветви q_1 , а по ветви q_2 может возникнуть даже обратный циркуляционный ток, показанный пунктирной стрелкой.



Фиг. 46

Итак, холодный поток нельзя делить на нисходящие струи.

Попробуем разделить его на восходящие струи получим совсем другие результаты. Допустим даже, что струи фиг. 47 не равны:

$$q_1 > q_2 \text{ и потому } t_2 > t_1.$$

ξ_1 и ξ_2 , то сопротивление гидростатического давления в мм воды в ветви q_1 при высоте ее h было бы, приняв вес m^3 печных газов при 0° в 1,29 кг,

$$1,29 h \left(1 - \frac{1}{1 + at_1}\right) = 1,29 h \frac{at_1}{1 + at_1}.$$

Для ветви q_2 гидростатическое давление равно:

$$1,29 h \frac{at_2}{1 + at_2}.$$

Из этих приращений гидростатических давлений некоторая часть расходуется на сопротивление трению ξ_1 и ξ_2 и на возбуждение скоростей u_1 и u_2

Последние потери будут иметь такое выражение в мм водяного столба:

$$\frac{u_1^2}{2g} \frac{1,29}{1 + at_1} \text{ и } \frac{u_2^2}{2g} \frac{1,29}{1 + at_2}.$$

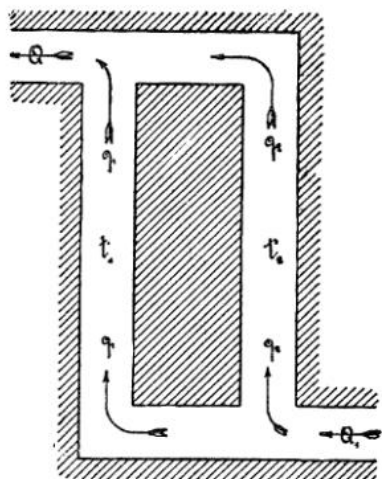
А условие равновесия приращений гидростатических давлений даст уравнение:

$$\begin{aligned} 1,29 h \frac{at_1}{1 + at_1} - \xi_1 - \frac{u_1^2}{2g} \frac{1,29}{1 + at_1} = \\ = 1,29 h \frac{at_2}{1 + at_2} - \xi_2 - \frac{u_2^2}{2g} \frac{1,29}{1 + at_2}. \end{aligned}$$

В этом выражении шесть переменных. Зная пять из них, получим шестую. Например, зная сопротивления ξ_1 и ξ_2 , t_1 и t_2 , может определять соотношение скоростей u_1 и u_2 .

Например: ячейки аппарата Каупера по его периферии теряют очень много на лучеиспускание и студят поток печных газов, по ним протекающий, благодаря чему в них идет усиленное движение печных газов, ибо если $t_2 < t_1$, то $u_2 > u_1$. Измерив t_2 и t_1 , не трудно найти $u_2 : u_1$

Если $t_2 > t_1$, то вес столба q_2 делается легче веса столба q_1 и поток q_2 начнет усиленно работать, что понизит температуру t_2 и повысит t_1 пока они не выровняются; тогда выровняется и мощность потоков q_1 и q_2 .



Фиг. 47.

Отсюда следует, что холодный нагревающийся поток нужно делить на восходящие струи.

Закон о делении газовых потоков, несмотря на свою простоту и элементарность, до сих пор не усвоен металлургами. Его знают прекрасно опытные печники, строящие печи для комнатного отопления, и не знают многие видные инженеры.

В дальнейшем будет приведено много примеров конструкций, противных природе, и потому плохо работающих или совершенно оставленных.

На практике встречается так много ошибок, что перечислить их нет никакой возможности, а потому я думаю, что лучшим методом изложения будет систематическое описание всевозможных типов печей с указанием конструкций правильных и ошибочных.

Порядок изложения будет такой:

1. Вертикальные регенераторы.
2. Лежачие регенераторы.
3. Регенеративные воздухонагреватели.
4. Уравнители температуры дутья.
5. Воздухонагреватели с чугунными трубами.
6. Камерные печи кирпичного и керамического производства.
7. Цементационные печи.
8. Печи для приготовления ковкого чугуна.
9. Кольцевые печи.
10. Муфельные печи.
11. Вертикальные печи для закалки, отжига и отпуска.
12. Горизонтальные закалочные печи.
13. Печи для отжига котельных листов.
14. Обыкновенные печи для нагрева слитков.
15. Нагревательные печи Сименса.

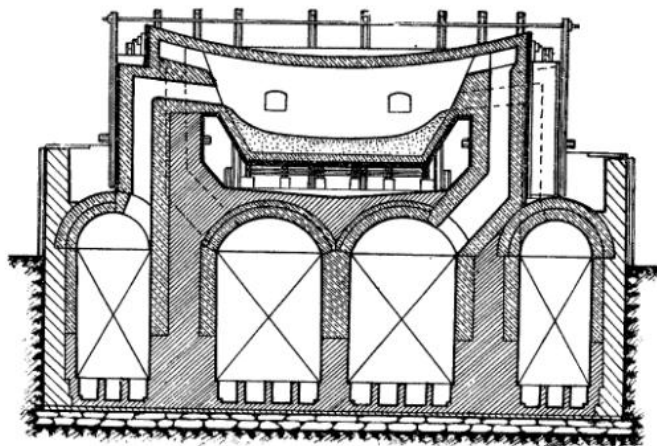
16. Колодцы с отоплением.

17. Печи для нагревания слитков.

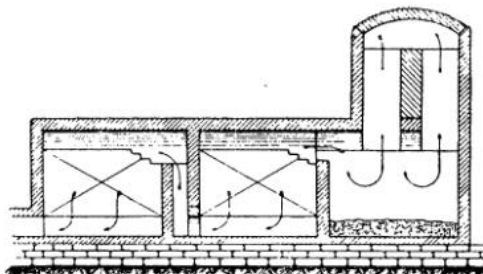
18. Коридорные печи.

Вертикальные регенераторы.

Обыкновенный тип вертикальных регенераторов мартеновских печей построен совершенно правильно. Печные газы высокой температуры равномерно спускаются сверху вниз, делясь на равные, нисходящие струи ¹⁾. Поэтому идея Шенвальдера разделить регенераторы каждый на две части и тем способствовать их равномерной



Фиг. 48.



Фиг. 49.

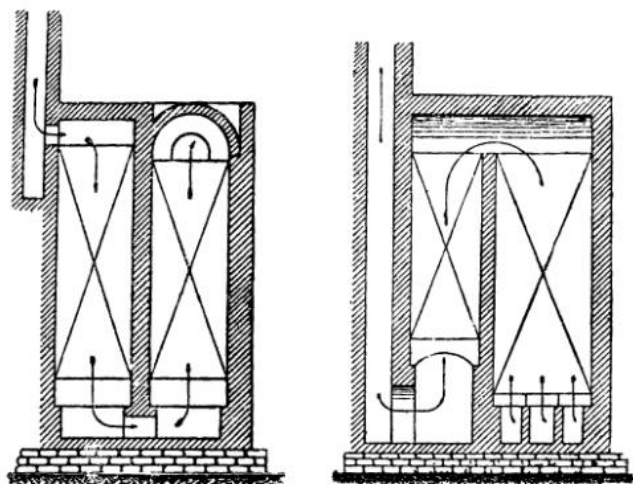
работе, идея в основе ложная. Она вызвала излишне сложную конструкцию регенераторов и потому брошена.

Однако, из сказанного не следует, что, как ни устроить вертикальные регенераторы, они всегда будут работать равномерно. Несомненно, что вертикальные регенераторы стремятся работать равномерно, но неправильным их устройством мы можем испортить их работу.

Например, на фиг. 48 представлен очень распространенный тип регенератора, в котором фонтан печных газов из вертикальных каналов прямо бьет в решетку регенератора. Очевидно о равномерной работе решетки в этом случае нечего и думать.

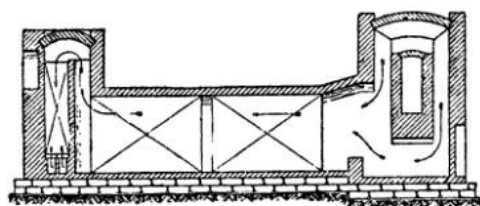
¹⁾ Холодный же воздух и газ равномерно поднимаются, делясь на восстающие равные струи.

Равномерно решетка может работать только тогда, когда скорость печных газов в свободном пространстве под сводом регенератора будет нуль или близка к нулю. Вихревые движения в подсводовом пространстве регенератора есть сильнейший враг равномерности работы регенераторов. В интересах правильной работы регенераторов необходимо дать печным газам возможность успокоиться в шлаковиках и затем с небольшой скоростью вступить в подсводовое пространство регенераторов. Прекрас-

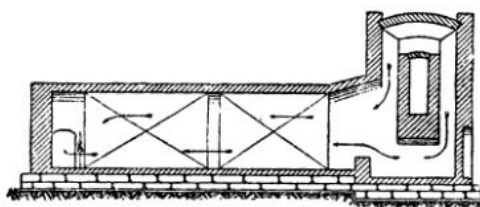


Фиг. 50.

Фиг. 51.



Фиг. 52.



Фиг. 53.

ный тип регенераторов мы имеем (фиг. 49) в 40-тонной мартеновской печи Pennsylvania Steel Co.

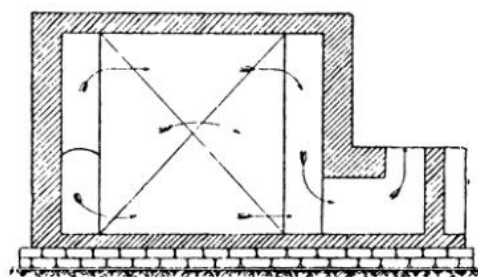
Время от времени появляются печи, где вертикальным регенераторам придается конструкция, нарушающая основной принцип движения остывающих печных газов вниз, а воздуха вверх. Примеры такой ошибочной конструкции мы видим на фиг. 50 и 51.

В обоих этих случаях печным газам придано переменное направление: на фиг. 50—сверху вниз (правильное) и снизу вверх (неправильное), и на фиг. 51—снизу вверх (неправильное) и сверху вниз (правильное).

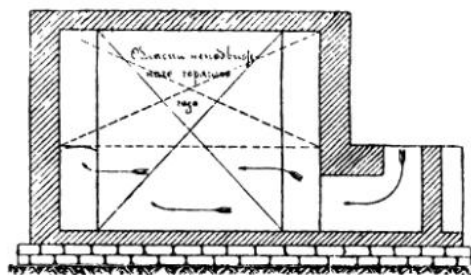
Лежачие регенераторы.

Лежачие регенераторы пользуются дурной славой и немудрено, ибо в них чаще, чем когда-либо, делаются грубейшие ошибки при делении потоков. Возьмем, например, регенераторы прославленной печи Н. Н. Campbell, которые не могут хорошо работать (Фиг. 52).

Действительно, в регенератор сверху поступают горячие газы и сверху же отводятся; ясно, что по полости регенератора они будут течь, как газослива и будут иметь высоту газослива, не коснувшись пода регенератора



Фиг. 54.



Фиг. 55.

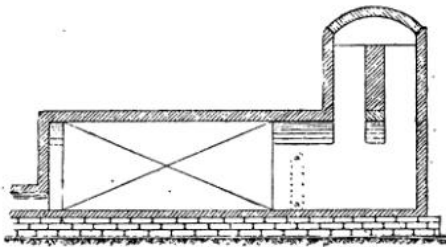
Нет ничего легче, как исправить эти регенераторы и заставить их работать правильно; на фиг. 53 показано такое исправление; надо пустить горячие печные газы сверху и выпустить их снизу, рассчитав h , высоту канала, ведущего к перекидным клапанам, по формуле И. Г. Есьмана¹⁾, что обеспечит касание нижнего зеркала потока—пода регенератора.

В чертеже, сделанном покойным Р. М. Даленом оказалась ошибочная конструкция (фиг. 54 и 55). Здесь печные газы приводятся в газовый регенератор не сверху, а в половине высоты. Такой газовый регенератор прогревается хорошо (фиг. 54); работает же неудовлетворительно, ибо нагретый легкий газ не может спуститься в выходной канал и вся верхняя часть регенератора совсем не работает (фиг. 55), это — мешок, заполненный горячим неподвижным газом.

¹⁾ См. стр. 27.

На фиг. 56 показана правильная конструкция лежачего регенератора. Показанная пунктиром стенка *aa* должна быть выкинута, как бесполезная.

Очень хороша конструкция, изображенная на фиг. 49. Это, собственно, не лежачие, а вертикальные регенераторы, но поставленные рядом. Движению газов в них придано правильное направление. Недостаток этих регенераторов—значительное сопротивление проходу газов.

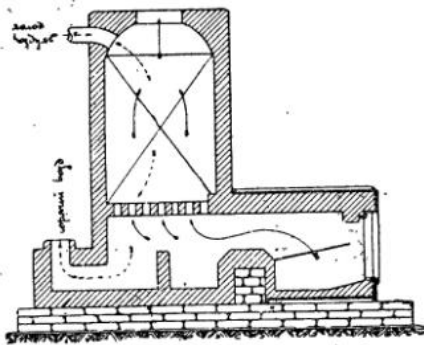


Фиг. 56.

Я не касаюсь регенераторов с перегородками вместо насадки, устроенных по типу воздухонагревателя Виттеля. О них будет сказано при разборе недостатков этого аппарата.

Регенеративные воздухонагреватели.

Принцип регенерации Сименса был применен для нагрева воздуха для домен в 1860 г. Каупером. Однако, сначала аппараты эти успеха не имели. В металлургии Перси-Веддинга сохранился чертеж этих первых регенеративных приборов (фиг. 57). Приборы отапливались каменным углем, доменный газ был применен позже; продукты горения направлялись прямо вверх и уходили через



Фиг. 57.

клапан в своде в атмосферу. Холодный воздух входил в аппарат сверху и выводился из аппарата снизу.

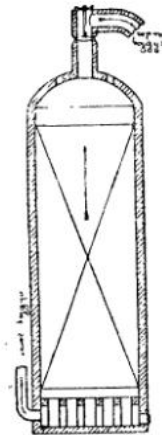
Из этого описания видно, что направление газов в этом приборе было дано неправильное.

Каупер заметил свою ошибку и в следующем гидроизменении своих аппаратов дал направление газам совершенно правильное. Пламя по центральной или эксцентричной трубе подводилось к куполу и обращалось вниз, разделяясь на множество

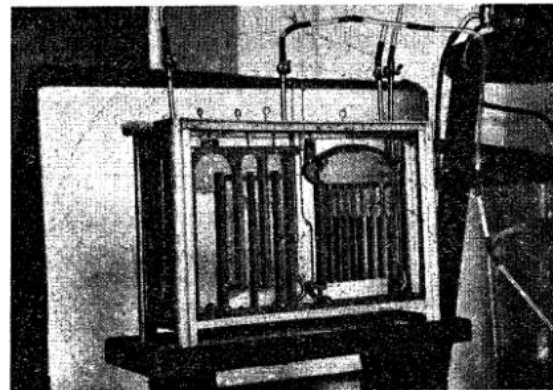
равномерных струй; собиралось под решеткой и удалялось через дымовой клапан. Холодный воздух входил в аппарат снизу, делился на восходящие струи и удалялся из-под купола вниз по сожигательной камере. В таком виде этот аппарат остается и до сих пор. Едва ли какой другой прибор подвергался большим переделкам, однако все эти модификации не получают распространения, ибо они почти всегда основаны на ложном понимании законов деления пламенных потоков.

{ Единственным слабым местом аппарата Каупера является его сожигательная камера, в виде трубы, занимающей очень много места и дурно исполняющей свое назначение сожигательной камеры. Поэтому попытки улучшить этот аппарат должны быть направлены в сторону упрощения трубы; сожигательной камерой должно быть подкупольное пространство.

Подобное устройство, но плохо разработанное, представляет патент Моог'а—фиг. 58. Первое видоизменение прибора Каупера было сделано Витвелем. Фотография фиг. 59 демонстрирует недостаток этих аппаратов. Здесь одно-



Фиг. 58.



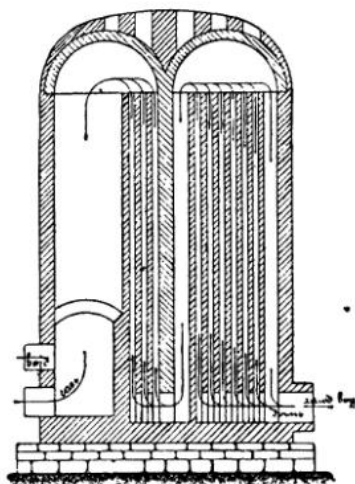
Фиг. 59.

временно в аквариуме с водой сняты модели: на- лево аппарата Виттеля, направо—Каупера в период нагревания.

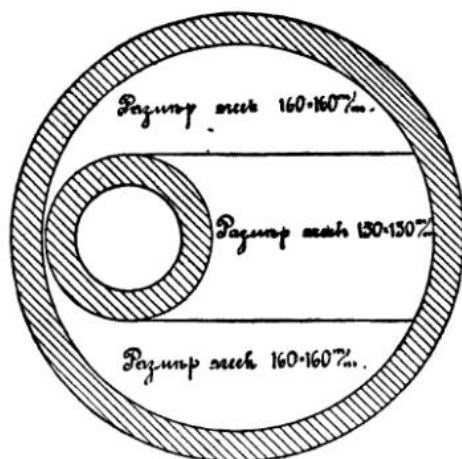
Совершенно ровная поверхность керосина, опускающегося в модели аппарата Каупера, указывает на совершенно равномерную работу решетки этого прибора. Напротив того, в аппарате Виттеля полости выполнены керосином далеко не одинаково. Те полости, в которых керосин опускается, выполнены прекрасно, те же полости, в которых керосин направлен кверху, невыполнены им: керосин струйками поднимается кверху, почти не омывая стенок воздухонагревателя. Прибор плохо

греется. Так же плохо он греет и воздух. Если в низ модели пустить воду, изображающую холодный воздух, то мы увидим, что полости, по которым вода поднимается кверху, прекрасно водой выполняются, по полостям же, где холодный воздух спускается, он падает струями вниз, очень плохо омывая стенки.

Одного взгляда на эти модели достаточно, чтобы понять, почему аппараты Виттеля везде оставлены¹⁾. Идеи Виттеля нашли себе осуществление в столь шумевших приборах Массика и Круга, которые отличаются только распо-



Фиг. 60.



Фиг. 61.

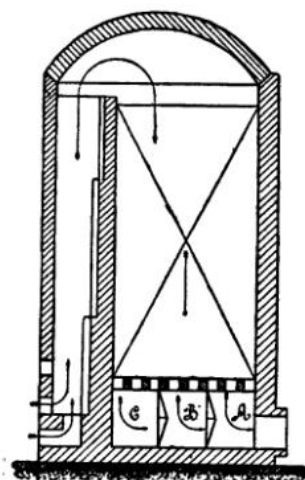
ложением камер, в которых газы имеют переменное направление. Теперь и эти приборы везде оставлены по понятной причине.

Когда регенеративная решетка одержала верх, то многие изобретатели старались обеспечить равномерность ее работы, не подозревая, что равно-

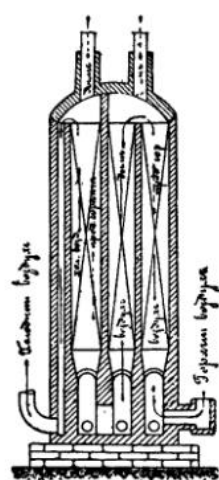
¹⁾ Виттель сам заметил недостаток этого прибора и в последних видоизменениях его (фиг. 60) дал газам правильное направление сверху вниз, приблизив по типу эти аппараты к регенераторам (фиг. 49) маргеновской печи Pennsylvania Steel Co.

мерное опускание горячих газов лежит в природе этих газов.

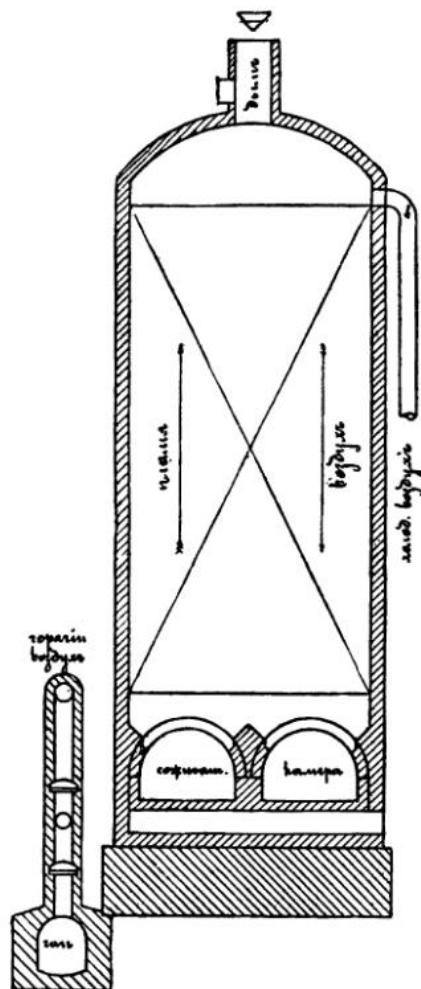
Одно время имел большой успех патент Беккера (фиг. 61), который делал ячейки решетки



Фиг. 62.



Фиг. 63.



Фиг. 64.

различной величины, чем очевидно заставил свой прибор работать менее равномерно¹⁾, чем обычно

¹⁾ Он ослабил трение в широких ячейках и получил потому более горячий дым, чем в узких ячейках.

венный каупер. На модели (фиг. 59) аппарата Каупера я нарочно сделал каналы, изображающие разрез решетки разной ширины, чтобы показать, что такое усложнение прибора совершенно безцельно.

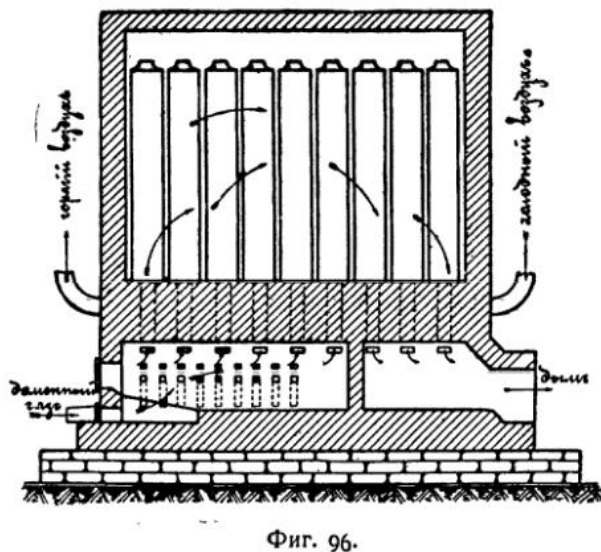
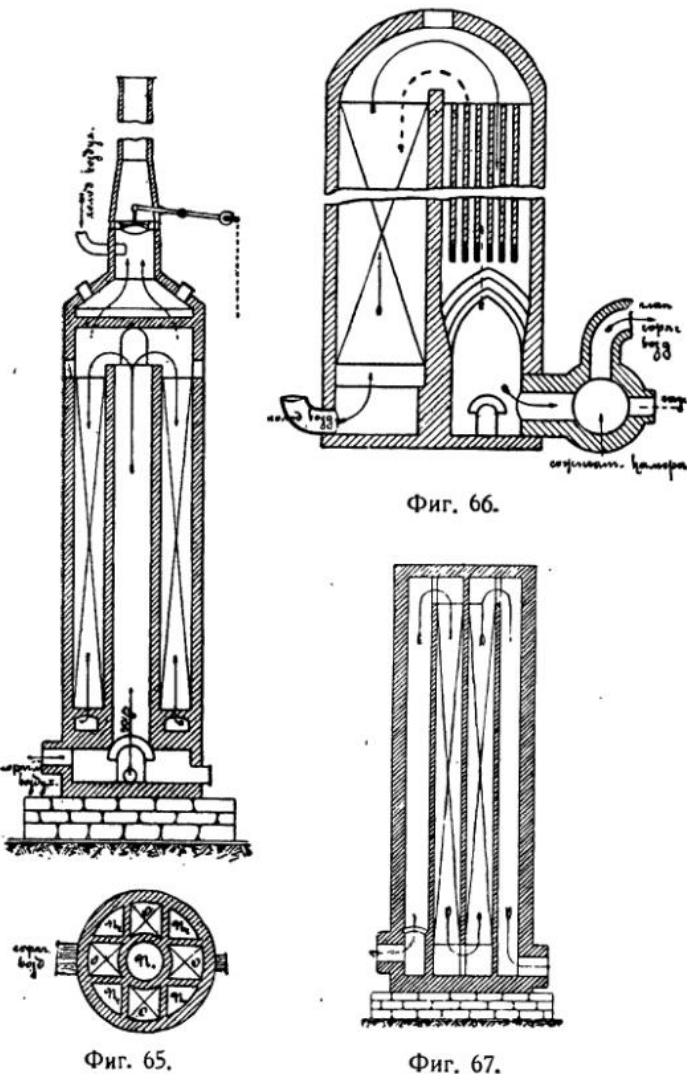
Я не останавливаюсь на патентах J. L. Stefenon & J. Evans (фиг. 62), на сложные перегородки и двери под решеткой аппарата для достижения правильного распределения пламени в решетке, как не получивших распространения, укажу только на курьезность спора между Люрманом и изобретателями, при чем Люрман ду-

Наван'а (фиг. 66), Массо (фиг. 67) с целью подтвердить свою мысль, что ясное представление о законах деления потоков не проникло в понятия современных металлургов.

Уравнители температуры дутья.

Нетрудно доказать, что построить разумный уравнитель температуры дутья есть задача неосуществимая.

На фиг. 68 имеем схему употребляемых уравнителей. Допустим, что температура дутья выше



мает, что наибольшее количество дыма идет через *A*, а наименьшее через *C*. Изобретатели утверждали противное. Вот насколько хаотичны понятия даже современных знаменитых конструкторов. Спор этот очевидно решается к удовольствию обеих сторон: в аппарате Каупера работа решетки совершенно равномерна и всякие двери под решеткой излишни.

Воздухонагревателей с неправильным направлением газов очень много. Привожу эскизы воздухонагревателя Hugh Kennedy (фиг. 63), Harvey (фиг. 64), Frank Roberts (фиг. 65),

температуры насадки. Тогда половина *A*, где горячие газы поднимаются, будет работать не равномерно, половина *B* прогреется равномерно. Половина *A* прогреется плохо; *B*—хорошо.

Температура дутья понизилась и стала ниже температуры насадки. Равномерно и быстро стынуть начнет половина *A*, половина *B* будет стынуть неравномерно и медленно.

Таким образом хорошей работы от уравнителя ждать не приходится, — вот причина, почему они мало распространены.

Воздухонагреватели с чугунными трубами.

Было время, когда о воздухонагревателях с чугунными трубами существовала целая литература. В металлургии чугуна Перси-Веддинга описывается 12 типов этих приборов; в ней посвящаются десятки страниц устройству чугунных труб и причинам их порчи. В конце-концов из всех этих многих типов приборов остался тип завода Bessège и Кливелэндский прибор; все остальные были брошены.

Где же причина этого? Причина проста: все приборы, описанные Перси-Веддингом имели отвод дыма сверху. Кверху стремились все языки острого пламени. Они лизали чугунные трубы, давали места сильного и слабого прогрева, а трубы коробились, горели и лопались.

В общеизвестном приборе Bessège продукты горения переводятся из камеры в камеру окнами, расположенными у пода аппарата.

В этом аппарате языки острого пламени поднимаются вверх и попадают в область неподвижного жара, где сейчас же теряется их острота, происходящая от местного развития реакции горения под влиянием избытка воздуха. По мере остывания печные газы опускаются вниз, равномерно обогревая все трубы, отчего эти последние хорошо служат.

Менее распространенный Кливелэндский прибор тоже работает с обращенной тягой (фиг. 69).

Пример сонма вымерших систем аппаратов с чугунными трубами и живучести типа Bessège и Кливелэндского представляет хорошую иллюстрацию важности правильного направления печных газов в печах.

Камерные печи кирпичного и керамиковых производств.

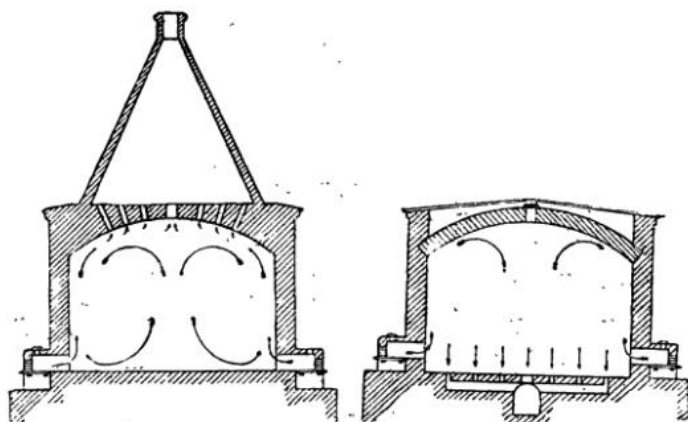
Лет тридцать назад исключительное распространение в кирпичном и керамиковом деле имели печи с прямой тягой. Теперь промышленники применяют их все реже и реже, переходя на печи с обращенной тягой и печь с прямой тягой является пережитком старого.

Тем удивительнее, что издание¹⁾ фирмы Эрнст Шматолла, специально строящей печи для керамикового производства, описывает целый ряд этих печей, вскользь упоминая только о том, что печи с обращенной тягой дают, в общем почему-то лучшие результаты, чем печи с прямой тягой.

В главе I (часть II), на стр. 17, я дал правило для расчета этих печей. Суживая дымовое отверстие, можно добиться того, что нижнее зеркало

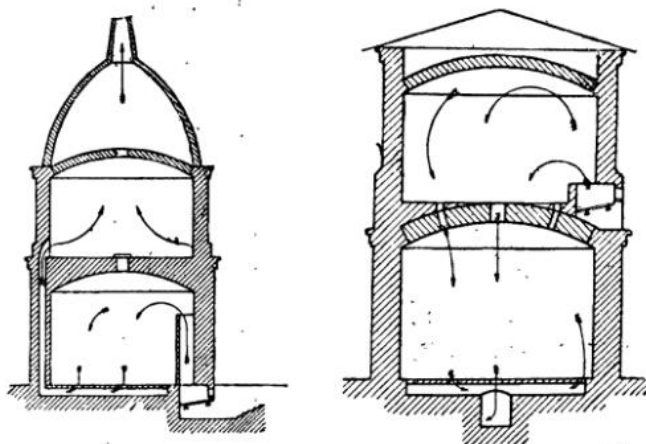
пламени, выполняющего полость печи, касается пода печи и этим путем можно заставить пламя нагреть и предметы, непосредственно лежащие на поду камеры; однако, такое прогревание очень несовершенно и неравномерно. Механизм такого прогревания состоит в следующем.

Раскаленные топочные газы из топки прямо поднимаются кверху (фиг. 70) так, что середина печи остается вне прямого восходящего потока топочных газов, а потому заполнена тяжелыми газами более низкой температуры. Эти тяжелые газы начинают падать на под камеры и замеща-



Фиг. 70.

Фиг. 71.



Фиг. 72.

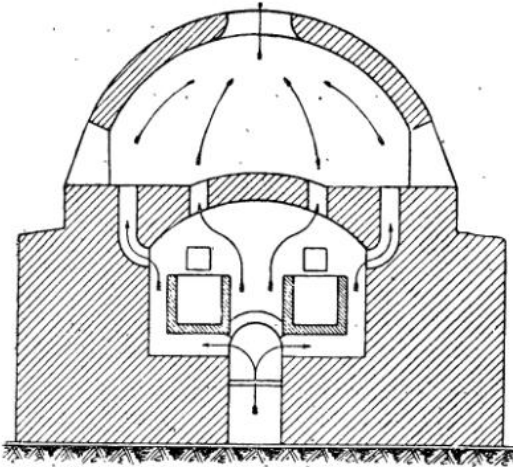
Фиг. 73.

ются горячими газами; таким путем устанавливается циркуляция пламени в камере и расположенные в печи предметы постепенно нагреваются. Однако так циркулирует только часть пламени. Большая часть вылетает через отверстие в своде прямо в трубу. Поэтому все предметы, встреченные прямым потоком топочных газов, будут обожжены сильно, все же предметы, омываемые циркуляционным потоком низкой температуры, будут обожжены слабо.

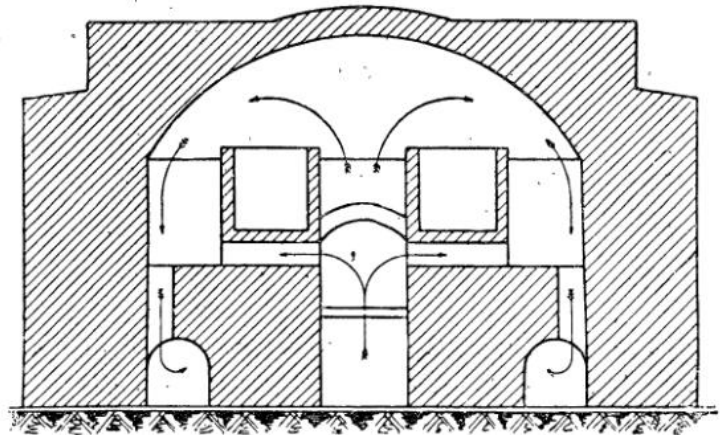
Хотя до сих пор во многих заводах еще работают печи с прямой тягой, но, в общем, принцип обратной тяги известен довольно широко, а потому очень долго на этом останавливаться не стоит.

¹⁾ Die Brennöfen—Ernst Schmatolla, 1923.

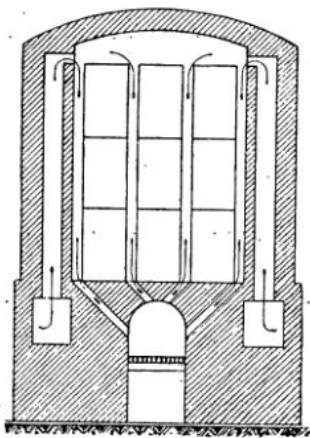
На фиг. 71 изображена та же печь, перестроенная на обращенную тягу. Деление потока пламени здесь совершенно правильно, ибо поднявшееся к своду печи пламя равномерно делится на нисходящий струи. Результатом перестройки явилось уменьшение брака кирпича с 30% до 1%. Фиг. 72 представляет этажную печь фарфорового производства старого типа. Такие печи еще существуют в работе, верхняя печь работает очень неудовлетворительно, ибо пламя делится здесь на восходящие струи и равномерность распределения его почти невозможно урегулировать размером пламенных



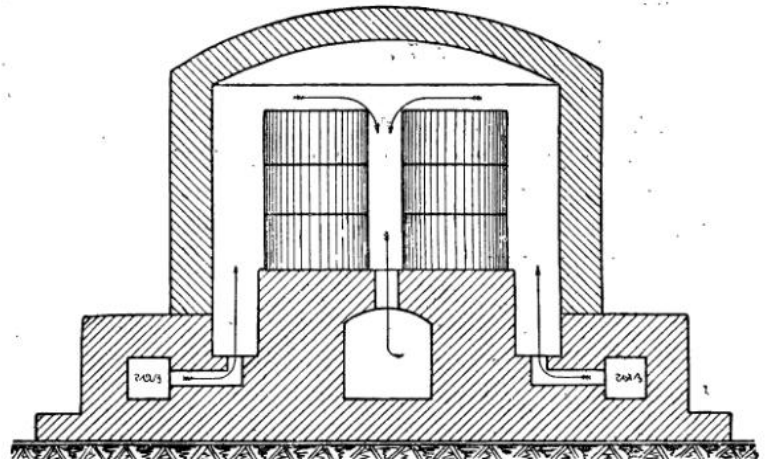
Фиг. 74.



Фиг. 75.



Фиг. 76.



Фиг. 77.

отверстий. Нижняя часть печи с обращенной тягой работает равномерно.

Фиг. 73 представляет печь того же типа, построенную правильно. Как верхняя, так и нижняя печи работают с обращенной тягой. Топки перенесены во второй этаж.

Цементационные печи.

На фиг. 74 представлена старая цементационная печь из курса Ледебур. Пламя из топки сразу делится на восходящие струи, охватываю-

щие ящики с цементируемым железом, пересыпанным углем.

Правильно было бы эти старые печи перестроить на печи с обращенным пламенем, как показано на фиг. 75.

Печи для приготовления ковкого чугуна.

На фиг. 76 представлена старая печь из металлургии Ледебур, на фиг. 77 патент P. Schnie 1898 г. на подобную же печь, но с обращенной тягой.

Очевидно, жизнь, а не теория научила изобретателя применить к этой системе печей обращенную тягу.

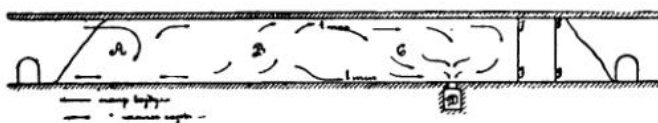
Кольцевые печи.

Несмотря на кажущиеся совершенство конструкции кольцевых печей, они всегда работают недостаточно удовлетворительно. Недостатки их: резкость остывания обожженных продуктов и масса брака из-за трещин; громадный избыток воздуха в пламени и вызываемая этим острота

пламени; высокая температура дыма; избыток расхода топлива; все это — результаты нарушения законов деления потока пламени в этих печах.

Чтобы быть ясным, возьмем простейший случай (фиг. 78): часть коридора *A* — где подогревается воздух; *B* — где бросается топливо и материал обжигается; *C* — где материал подогревается теряющимся жаром; *D* — боров дымовой трубы; *F* — заклеенная бумагой стенка.

Начнем наши рассуждения с части коридора *B*. Здесь развивается пламя. Наш идеал заключается в том, чтобы это пламя двигалось по всему сечению коридора, делясь на равные, равномерно остывающие струи, попадающие в дымовой боровок *D*. Положение боровка *D*, взятого с пода коридора в общем благоприятствует такому делению потока, ибо струи пламени имеют направление вниз. Тем не менее, мы не должны рассчитывать на вполне равномерный обжиг вверху и внизу, ибо поверху коридора будет течь, как легкая жидкость пламенный поток высокой температуры t_{max} по низу коридора будет течь остывший, более тяжелый дымовой поток низкой температуры t_{min} . Для того, чтобы сделать разность температур ($t_{max} - t_{min}$) возможно малой, надо увеличить,



Фиг. 78.

плотной кладкой обжигаемого материала сопротивление движению газов по верху и уменьшить редкой кладкой сопротивление проходу газов по низу. Этим искусственным путем мы главную массу газов пустим по низу коридора и выровняем температуру t_{min} и t_{max} .

Итак, в части *C* должна быть кладка:

- 1) наверху — плотная,
- 2) внизу — редкая.

Перейдем к части коридора *A*. Эта часть заполнена раскаленным материалом, по поду ее движется подогреваемый воздух, как тяжелая жидкость, не имеющая никакого стремления подняться кверху. Заставить ее подняться кверху можно, только увеличив сопротивление плотной кладкой внизу и редкой кладкой вверху.

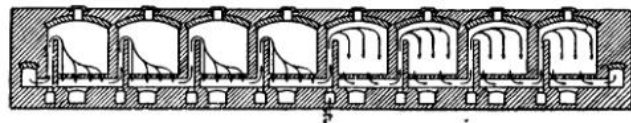
Сравним это требование с тем, что мы имели для части *C*. Мы получили, как раз обратное части *C*.

Правда, усадка обожженного кирпича, особенно обожженной извести, облегчает наше положение, т. к. образует в части *A* просвет под сводом (в известковых печах даже очень значительный), но в общем в кольцевых печах мы находимся в очень трудном положении; у нас два выхода: 1) хорошо

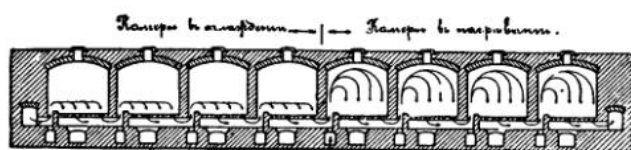
подогревать сырец, но зато работать на плохо подогретом воздухе и подвергать кирпич резкому остуживанию внизу, отчего он трескается, или 2) хорошо подогревать воздух, предохранить материал от резкого остуживания, но зато неравномерно подогревать сырец. Обыкновенно останавливаются на первом методе работы.

Например, при обжиге огнеупорного кирпича, на заводе в Боровичах, низ кольцевой печи нагружается «варюшками» для шамота, резкое остуживание которых не вредит их качеству. Укладывая возможно редко варюшки у пода, верх камеры загружают очень плотно огнеупорным кирпичем; этим путем тормозится подсводовый поток горячего пламени и пламя спускается вниз; газы стьнуть и образуют поток по поду камеры из холодного дыма.

Кирпич, заполняющий верхнюю часть камер, обжигается недурно, но утилизация тепла на нагрев воздуха очень плоха, и печь работает на слабо подогретом воздухе.



Фиг. 79.



Фиг. 80.

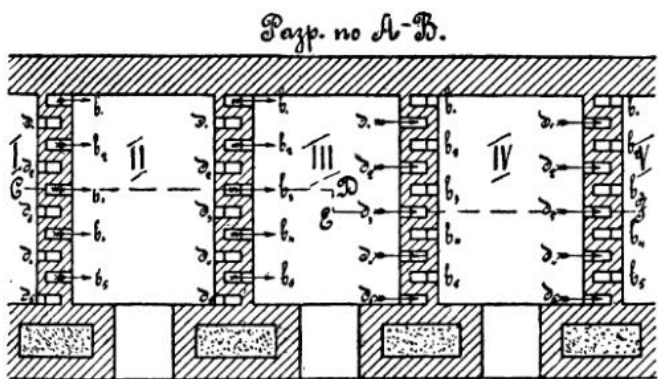
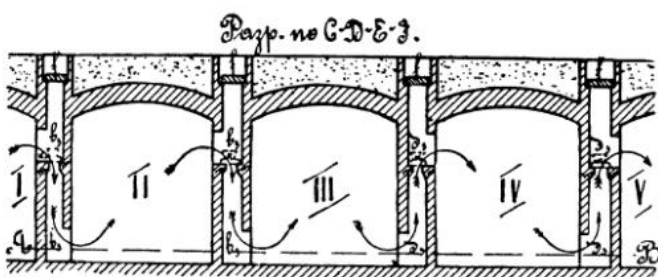
Итак, в кольцевых печах существует ошибка в конструкции, заключающаяся в том, что потоки газа, — нагревающегося (воздуха) и стьющего (печные газы), — имеют одно и то же направление, тогда как необходимо, чтобы поток стьющий имел нисходящее направление, а поток греющийся — восходящее направление. Удовлетворить этому требованию простая кольцевая печь не может и потому работа ее всегда недостаточно совершенна.

Существующие системы камерных кольцевых печей Мендгейма и других столь же мало удовлетворительны, как и простые кольцевые печи.

На фиг. 79 и 80 показаны два типа печей Мендгейма — с поднятым порогом и без него. Наружный воздух входит в печь через выгруженную камеру и проходит поочередно все камеры, находящиеся в охлаждении. Протекание воздуха показано стрелками; холодный воздух стелется по поду, неравномерно и резко студит обжигаемый кирпич, сам плохо нагревается и очень плохо студит камеру. Под влиянием моих работ в области теории печей, наш инж. К. К. Адамецкий

(Варшава) взял привилегию на усовершенствование кольцевых печей введением дополнительных каналов, соединяющих нижнюю часть каждой камеры с верхней частью предыдущей или последующей камеры или же одновременно с обеими. Этим путем ему удалось осуществить принцип нисходящего потока для пламени и восходящего потока для воздуха, но конструкция вышла несколько сложная, что побудило меня подумать об ее упрощении и выработать простой конструктивный тип рациональной кольцевой печи.

Фиг. 81 представляет эскиз этой печи. Здесь в камере III происходит горение; в камере I и II подогревается воздух; в камерах IV и V подготавливается кирпич. Остывающие газы имеют нисходящие направления, нагревающийся воздух — восходящие направления; т. е. движение газов со-



Фиг. 81.

вершенно правильное. Обращение направления газовых потоков производится системой чередующихся каналов в разделяющих камеры стенах, — каналов b_1b_1 , b_2b_2 , b_3b_3 для воздуха и d_1d_1 , d_2d_2 , d_3d_3 для печных газов. При пуске в камеру газа (например в IV) каналы dd должны быть закрыты, а bb должны быть открыты.

Прикрытие и открытие каналов bb и dd делается крайне просто кирпичами, показанными пунктиром.

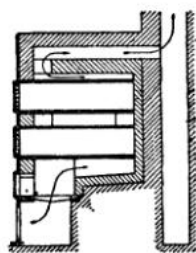
На фиг. 81 изображена печь в первоначальном виде. Впоследствии оказалось, что прикрывать каналы не нужно (Подробнее см. часть IV, гл. V).

Муфельные печи.

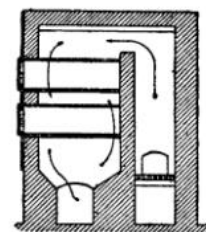
Для отжига и закалки стали, латуни и других потребностей, муфельные печи представляют очень

много удобств. Ровная температура, отсутствие языков пламени, малая окисляемость и абсолютная чистота поверхности (условие крайне важное для штамповки) делает эти печи излюбленным типом заводов. Часто жалуются на непрочность муфелей, однако при правильном направлении пламени стальные литые муфеля и даже чугунные работают годами. К сожалению, идея правильного направления пламени далеко не пользуется распространением.

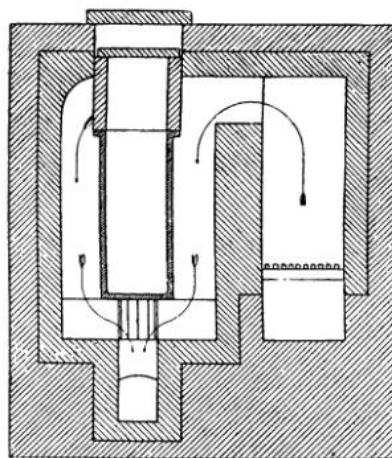
На фиг. 82 представлена муфельная печь, весьма распространенная на заводах. Пламя развивается в топке, расположенной внизу, и имеет восходящее направление. Следствием является не-



Фиг. 82.



Фиг. 83.



Фиг. 84.

равномерное нагревание муфелей, а потому и скорая их порча.

На фиг. 83 показан способ заставить печь эту работать вполне равномерно. Для этого пламя обращено вниз. Дымовой боровок собирает отработавшие печные газы с пода печной камеры, в которой вмазаны муфеля.

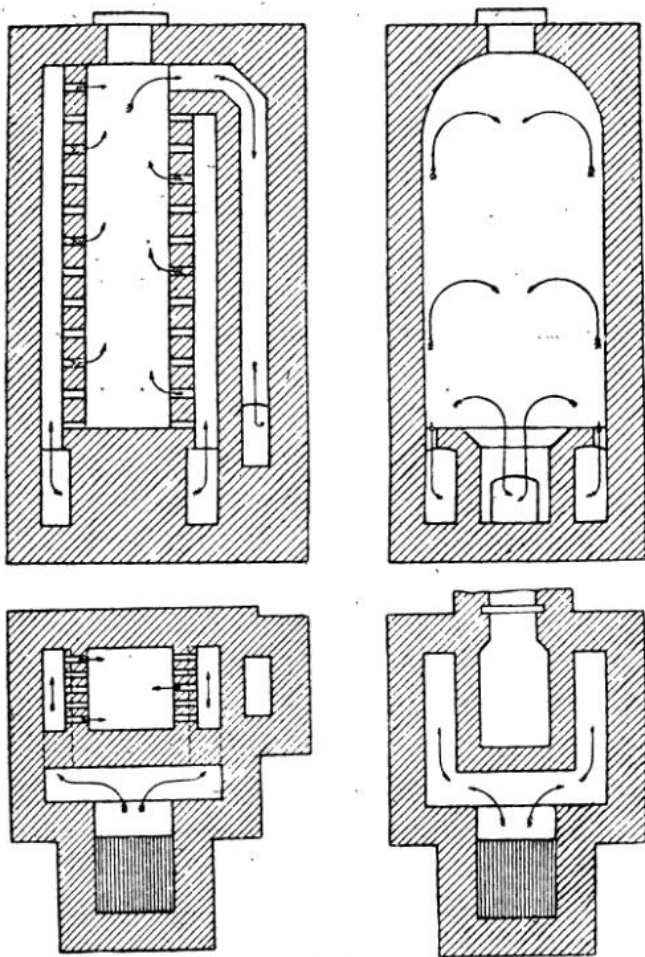
Благодаря неправильному направлению пламени, вертикальные муфеля для закаливания снарядов удаются весьма редко; однако мой опыт указал что такой скептицизм не имеет места, если пламени придано правильное направление. Муфель, изображенный на фиг. 84, работает идеально.

Вертикальные печи для закалки, отжига и отпуска.

Нигде применение идеи обращенного пламени не может дать таких блестящих результатов, как в этих печах и нигде мы не наблюдаем таких несовершенных печей, как именно в печах закалочных.

Причина этому простая. «Закалочная» — это секрет всякого завода. Но мне кажется, что люди, делающие секреты, знают всегда меньше людей, их не делающих.

Тем не менее, печи для закалки и отжига, имеющие температуру в гредетах 800—1000°C, суще-



Фиг. 85.

Фиг. 86.

ствуют и—худо ли, хорошо ли—но работают. Что касается печей для отпуска, то их нет и дело отпуска поставлено еще хуже, чем дело закалки.

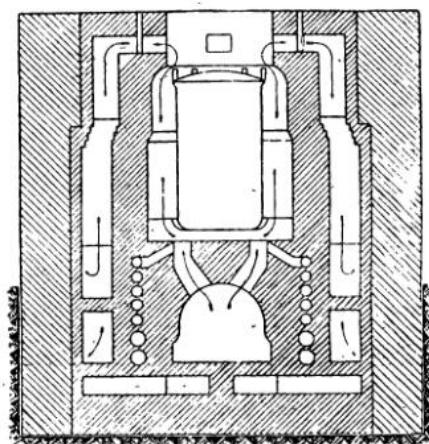
Для печей для отпуска нужна температура ниже 700°, т.е. температура, при которой реакция горения не идет, а потому печные газы надо получить вне печи, в особой сожигательной камере охладить до требуемой температуры, провести в рабочее пространство печи и нагреть его равномерно до температуры 400—500—600°, как требуется.

Закалочные печи для крупных орудий делаются в виде колодца, на различных горизонтах коего

установлены топки; дым отводится сверху. Орудие при этом вращается. Так нагревают орудия и в СССР и за границей, при чем у нас нагрев ведется на дровах, что гораздо лучше, чем работать на каменном угле. В последнее время закалочные печи для орудий строятся газовые, с очень большим числом горелок, расположенных по винтовой линии.

В этих печах делается две ошибки: 1) пламя горелок, имеющее высокую температуру, вводится в закалочное пространство; 2) дым отводится сверху.

Нагрев больших орудий до 700° длины представляет при этой системе много трудностей и, конечно, для закалки таких орудий надо применить идею обращенного пламени. Чтобы иллюстрировать, в каком направлении надо это сделать, привожу на фиг. 85 чертеж печи для закалки полевых ору-



Фиг. 87.

дий, действующей в настоящее время в одном из крупнейших заводов. Пламя развивается во внешней топке, из нее попадает в пазуху с обеих сторон рабочего пространства, через мелкие дырочки вступает в него и отводится сверху. Последний отвод сверху и портит всю печь. Сделай автор этой печи отвод печных газов с пода печи, печь работала бы гораздо равномернее.

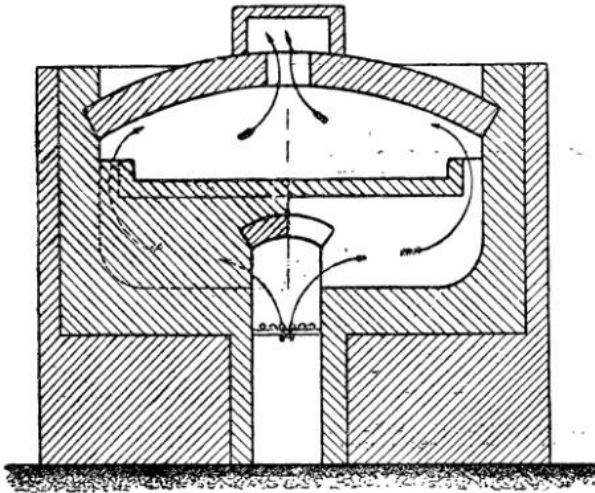
Еще проще придать печи абрис фиг. 86. Здесь пламя из внешней топки прямо проводится в расширенное рабочее пространство печи и отводится с пода печи. Движение газов указано стрелками.

Конечно, такая система применима только для полевых орудий. Колодец в 9 сажен глубины, для морских гигантов, нельзя отапливать таким простым способом, но в общем эта задача решается очень легко, если уничтожить лучеиспускание рабочего пространства.

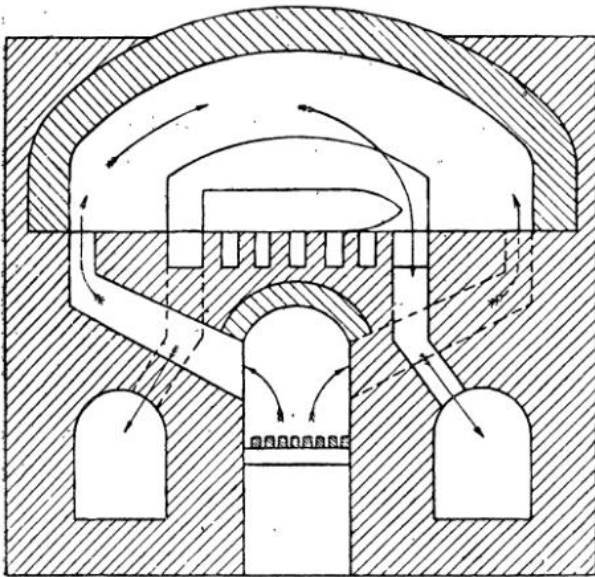
К типу вертикальных отжигательных печей относятся печи для отжига проволоки перед и во время волочения. В моем распоряжении находится

чертеж такой печи системы Мейля, построенной одним из русских заводов и оказавшейся, несмотря на свою сложность и дороговизну, крайне неудовлетворительной. Печь отжигала неравномерно и впоследствии была перестроена. На фиг. 87 ясна причина столь печальных результатов работы этой печи: пламени дано возрастающее направление, почему чугунный горшок, вводимый в камеру, греется неравномерно. Кроме того, узость камеры препятствует правильному развитию пламени.

Ясно, что печь должна быть перестроена на печь с обращенной тягой и сожигательной камерой.



Фиг. 88.



Фиг. 89.

Горизонтальные закалочные печи.

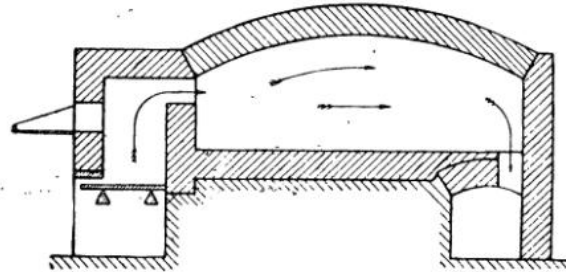
На фиг. 88 изображена закалочная печь для снарядов завода Круппа. Завод Круппа держится системы нагревания предметов теплом, «отраженным» от свода. Ниже мы увидим, к каким курьезным конструкциям приводит эта теория. В этой печи снаряды, перекатываемые по поду, нагреваются

тоже «отраженным» теплом, ибо раскаленные газы коксовой топки проходят под сводом в отверстия в ключе свода; раскаленными же газами снаряды не омываются, а находятся как бы в мешке среди остывших неподвижных газов.

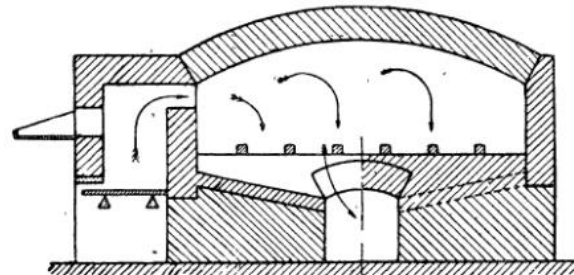
Работа этой печи была мало удовлетворительна. Кроме того, было желательно кокс заменить дровами, как более дешевым топливом. Печь эту перестроили согласно моему чертежу (фиг. 89). Оставив общее расположение печи тем же, я обратил пламя вниз и, расположив снаряды на решетчатом поду, озабочился удалением из-под снарядов остывших печных газов в дымовые пролеты. Печь работает прекрасно.

Печи для отжига котельных листов.

На фиг. 90 представлена общепринятая печь для отжига листов с обращенным пламенем. Эта печь работает прекрасно, но имеет крупный недоста-



Фиг. 90.

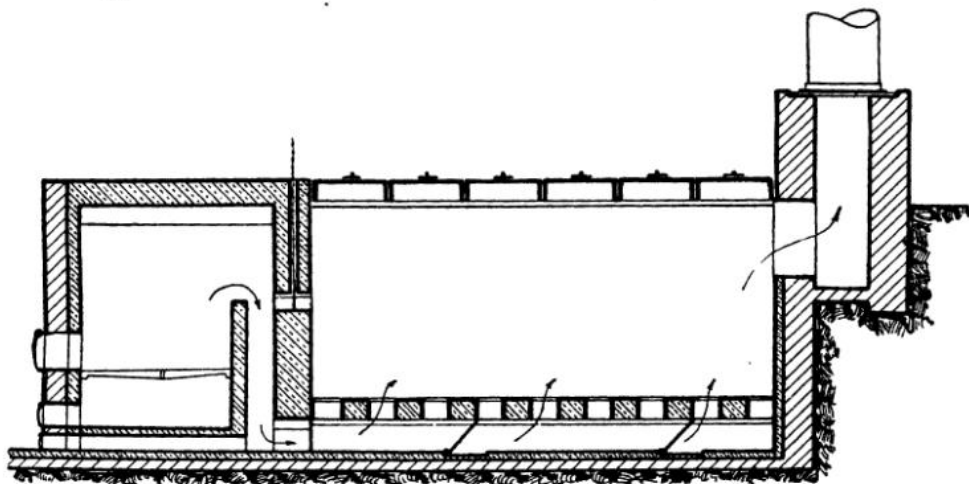


Фиг. 91.

ток: отжиг идет по одному листу, занимающему весь под, и потому производительность печи мала и расход каменного угля велик. Если в этой печи нагревать несколько листов, положенных друг на друга, то они прогреваются чрезвычайно плохо, ибо холодные, отработавшие печные газы не имеют возможности покинуть рабочее пространство печи. Рабочее пространство не канализовано. Для быстрого нагрева рабочее пространство надо освободить от стывших газов, для чего полезно придать печи конструкцию фиг. 91. Листы передвигаются по железным или чугунным колосникам или брускам. Боровок расположен под серединой пода и холодные газы из-под нагреваемых листов попадают в боровок и оттуда в дымовую трубу.

Чем энергичнее омывание листов снизу, тем скорее идет прогрев листов.

Инж. Рейнеру пришла идея отжигать листы в подвешенном состоянии и он konstruirовал печь фиг. 92. Эта печь не пошла и идея отжигать листы в подвешенном состоянии была оставлена. Не пошла эта печь потому, что пламени дано восстающее направление и отжиг был неравномерен. Если обратить пламя, сделать постоянный свод, то в нашем распоряжении остается боковая стенка для дверей и можно бы осуществить идею Рейнера достаточно конструктивно.



Фиг. 92.

Печи для нагрева слитков с обыкновенной колосниковой решеткой.

В печах с простой колосниковой решеткой температура сварочного жара (1350°) достигается при экономном расходе воздуха в топке. Избыток воздуха $1\frac{1}{2}$ или $1\frac{3}{4}$ против теоретического, смотря по качеству топлива, понижает настолько температуру пламени, что достигнуть нужной температуры оказывается невозможным.

Это делает эти печи очень деликатным механизмом и они удаются при соблюдении двух условий:

1. Хорошем смешении воздуха с горючими газами.

2. Пропорционировании печи так, чтобы фокус горения расположился в начале рабочего пространства печи. Кроме того, т. к. температура печи совпадает с расчетной температурой пламени, то время пребывания пламени в рабочем пространстве печи менее секунды, а потому питание рабочего пространства пламенем и удаление отработавших газов должны совершаться в строгом порядке.

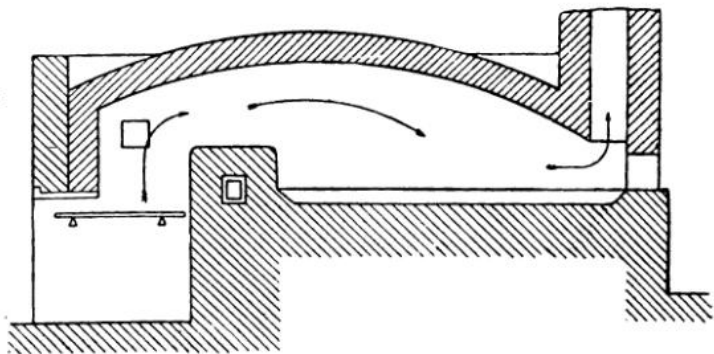
Из сказанного очевидно, что пропорционирование этих печей есть прежде всего вопрос «горения» и только в последней своей части касается вопроса, нами обсуждаемого, о направлении пламенных потоков. Не рассматривая вторично (см. часть I)

первые два вопроса, я ограничусь замечанием, что для лучшего смешения элементов пламени в этих печах часто прибегают к суживанию пламенного окна, все равно, как в керосиновой горелке суживают пламя и тем избегают копотливости лампы.

Единственным последствием сужения пламенного окна, является увеличение в нем скорости пламени; пламя затормаживается в рабочем пространстве понуростью свода этих печей и направляется им на под, с пода же убирается через дымовой пролет.

Отсюда ясна необходимость расположения дымового пролета на уровне пода этих печей и ясна ошибочность конструкций всех печей с пролетом в своде.

Практика вполне подтверждает наш вывод: во всех сварочных печах железного производства отводят печные газы с пода; в печах же медно-



Фиг. 93.

плавильных, свинцовых и проч., остались еще пережитки старых печей с отводом дыма со свода.

Фиг. 93—печь для очистки меди, отвод дыма сверху. В данном случае ванна находится в мешке остывших газов, что, конечно, понижает температуру печи.

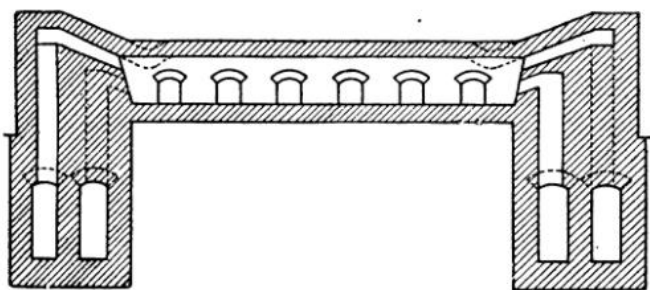
Нагревательные печи Сименса.

Печи Сименса симметричны и пролеты, питающие печь пламенем, служат также и для удаления продуктов горения. При постройке нагревательных и сварочных печей этой системы часто без всякой надобности копируют головки печей Мартена, не учитывая разницы в назначении печей.

Между тем разница весьма существенна и сводится к следующим положениям:

1. Температура нагрева слитков не выше 1300° , поэтому направление языка пламени на слитки не допустимо. В печах Мартена этого ограничения нет и направление языка пламени на поверхность ванны желательно.

2. Поверхность ванны печи Мартена кипит и поднимается иногда на 500—600 мм. Поверхность пода подогревательных печей твердая, слегка смоченная струйками сварочного шлака. Поэтому в печах Мартена пороги пролетов неизбежно приходится поднимать над ванной на высоту большую, чем подъем ванны во время кипения. Под-



Фиг. 94.

нимать же пролеты подогревательных печей над твердым подом не имеет никакого основания.

В самом деле, если мы поднимем порог пролетов в подогревательной печи на толщину слитка, как это обыкновенно делают, то этим самым мы обрекаем себя на невозможность удалить с пода слой остывших печных газов, в которых купаются подогреваемые слитки.

Очевидно, энергичное нагревание слитков возможно только тогда, когда остывшие печные газы удаляются с поверхности пода печи.

Отсюда ясно, что пороги пролетов подогревательных печей Сименса должны совпадать с уровнем пода.

В моем распоряжении имеется весьма интересная печь Сименса фиг. 94. Длина ее пода 8020 мм, высота свода над подом 1000 мм, ширина 2000 мм, головки обыкновенного типа.

Первоначально свод был сделан прямым. Затем он был опущен у головок печи до 680 мм. Очевидно, при длине печи в 8020 мм хвост пламени отставал от пода и слитки у дымовых пролетов им не обогревались. Происходило то же явление,

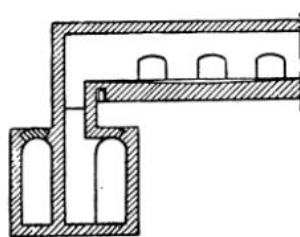
что и при очень длинных печах Мартена, когда за истощением живой силы фонтанов горячих газа и воздуха, хвост пламени поднимается под свод до нормальной высоты газового потока, вычисляемой по формуле И. Есьмана; в углу у дымовых пролетов получается мешок остывших газов и ванна мерзнет. Такой случай наблюдался на нефтяных печах завода Гужона в Москве при длине печи в 14 м и вызвал постановку двух нефтяных форсунок, поставленных одна за другой.

В данном случае было поступлено иначе: у головок свод был опущен до высоты газослива и этим путем принудили пламя лизать под не только по выходе из пролетов печи, но и во всей второй половине печи.

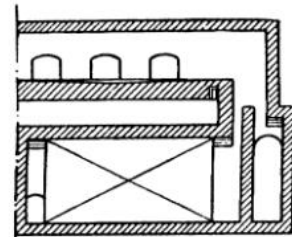
Отдавая полную дань уважения этому методу исправления недостатков общепринятого типа головок, я думаю, что можно достигнуть гораздо лучших результатов другим путем.

На фиг. 95 и 96 представлены два эскиза конструкций, применимых в данном случае.

В основу обоих этих конструкций положены следующие соображения:



Фиг. 95.



Фиг. 96.

а) Холодные печные газы удаляются с пода нагревательной печи; такой способ отвода их усиливает и упорядочивает омывание слитков горячими газами, что способствует быстрому и равномерному нагреву слитков.

б) Генераторному газу и воздуху, вступающим в печь, даны минимальные скорости, с целью получения горения во всей печи и устранения фокуса горения в языке пламени.

При подогретом воздухе и газе температура языка пламени может подняться выше $1500-1600^{\circ}$, что очень опасно для нагреваемых слитков.

Смешение генераторного газа и воздуха предположено вне рабочего пространства печи.

в) Для того, чтобы сварочный шлак не попадал в пролеты печи, поду дан уклон к середине печи, основание же пролетов энергично студится чугунными порогами с принудительной циркуляцией холодного воздуха, при помощи вытяжной трубы.

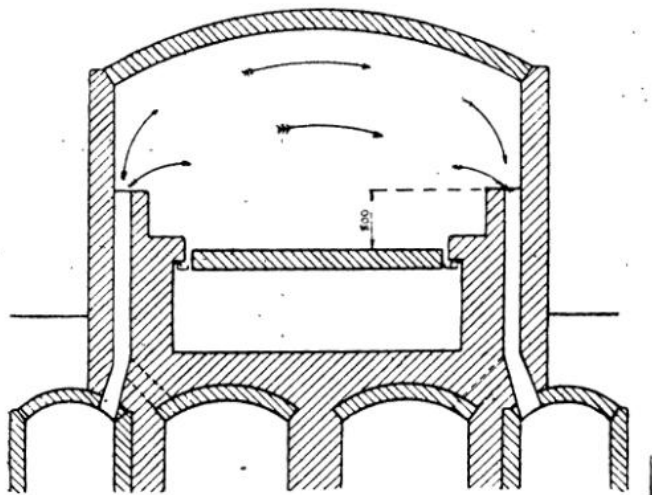
Интереснейший пример полного пренебрежения основными положениями рациональной конструкции печей представляют печи Сименса для цементации и закалки броневых плит завода Круппа,

характерного своею отсталостью в конструкциях печей.

На фиг. 97 мы видим, что вертикальные головки печи Сименса подняты на 800 мм над подом печи и хотя броня укладывается на выдвинутой под на кирпичных столбиках, но тем не менее она помещена в мешок холодных газов, удалить которые из-под брони нет никакой возможности. Если прибавить к тому же, что на этих печах всегда работали с отрицательным давлением, то ясно, что нагревание вели в потоке засасываемого холодного воздуха.

Результаты такой работы ясны. При цементации предполагалось нагревать две броневых плиты, обращая их лицом друг к другу, с промежутком между ними древесного угля.

Оказалось, что нижняя плита цементовалась гораздо медленнее верхней и пришлось отказаться от идеи цементовать две брони сразу. Теперь це-



Фиг. 97.

ментуют по одной плите, занимая двойное количество печей и вдвое увеличивая расходы эксплуатации.

Однако гипноз фирмы Круппа так велик, что срезать головки до уровня пода заводы не решаются.

Колодцы с отоплением.

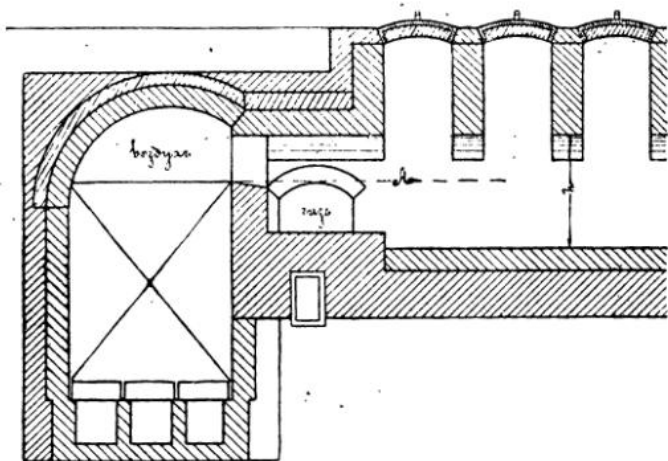
В колодцах, для нагревания слитков стоя, чаще всего делаются ошибки в отводе дыма. Здесь, благодаря большей высоте рабочего пространства, более, чем в какой-либо другой системе, надо озаботиться правильным удалением дыма с пода колодцев, ибо иначе нижние части слитков попадают в мешок застойных газов и плохо нагреваются.

Из имеющихся у меня конструкций вполне удовлетворительной нет ни одной, в некоторых же принцип правильного отвода дыма нарушен весьма грубо.

На фиг. 98 представлены пролеты колодцев «системы Сименса», чертежи коих оплачиваются очень дорого.

Колодцы эти имеют только воздушные регенераторы, газовых нет.

Таким образом продукты горения могут быть удалены из рабочего пространства только через воздушные регенераторы, которые взяты на 600 мм выше уровня пода колодцев (см. пунктирная линия А). Ясно, что на поду колодцев получился мешок холодных газов. Чтобы спасти печь и заставить ее работать, остается единственное средство понизить перегородки между колодцами так, чтобы высота h равнялась бы высоте газослива, вычисленной по формуле Есьмана. Так построенные колодцы будут работать, но в полости рабочего пространства скорость печных газов будет скоростью нормального газослива, т.е. при высоте h около метра = 9 м/сек. Такая скорость



Фиг. 98.

крайне невыгодна, т. к. теплота пламени не успеет передаться слиткам и расход топлива будет очень велик. Лучшим исправлением печи будет, если мы опустим окно в воздушный регенератор на уровень пода колодцев.

На фиг. 99 представлены колодцы Сименса по проекту Р. Далена, построенные в Н.-Салдинском заводе. Пламя отводится сверху, почему низ слитков им плохо омывается. Действительно, во время работы этих колодцев низ слитков прогревался всегда хуже верха, что заставляло садить слитки толстым концом кверху, опирая их на стены. Для улучшения работы в печи следует опустить пламенное окно на уровень пода печи.

Так как колодцы Сименса представляют незаменимое по удобству устройство, то я приведу принципы правильного их конструирования.

1. В рабочем пространстве колодцев желательно слабое отрицательное давление, дабы при снижении крышек не обжигать рабочих.

2. Своды регенераторов должны быть на одном уровне с крышками, чтобы было удобно перекрыть всю печь чугунными плитами заводского пола.

3. Регенераторы всего удобнее делать лежачими—так, чтобы печные газы поступали в регенераторы сверху, а уходили к перекидному клапану снизу.

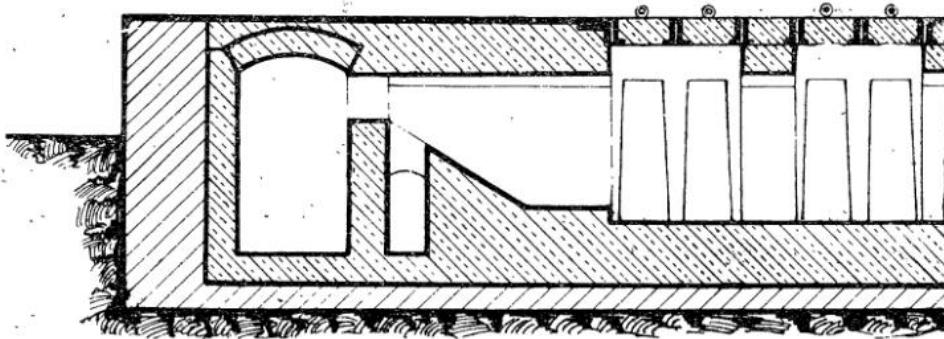
4. Пролеты должны быть расположены у пода колодцев. При таком устройстве нет нужды низко опускать перегородки между колодцами и движению пламени можно дать малую скорость.

5. Размеры пролетов вычисляются как газосливы, чем достигается минимальная скорость истече-

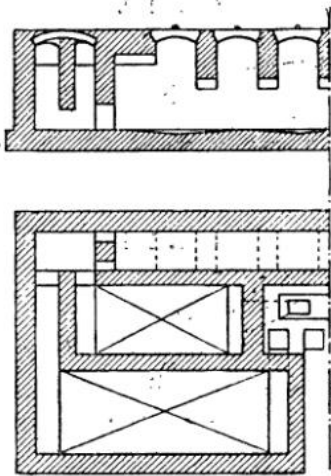
железа полны логических ошибок. Начнем рассмотрение их в строгой последовательности.

Под — может быть плоским; однако, в последние годы решительное преимущество получают печи, в которых железо подогревается на трубах, расположенных на некоторой высоте над кирпичным подом. Эта конструкция строго логична. Печь, как всякий организм, должна, во-первых, правильно питаться горячими газами топки и, во-вторых, своевременно освобождаться от остывших, отработавших газов.

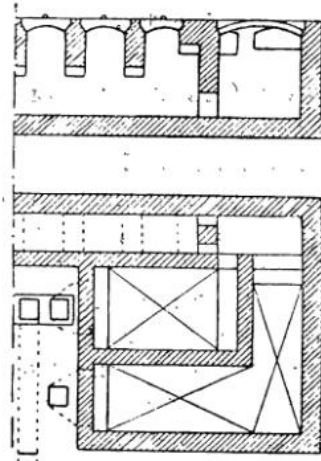
Застой холодных газов в печи наносит ей громадный вред, так как задерживается поступление



Фиг. 99.



Фиг. 100.



Фиг. 101.

ния газа и воздуха из пролетов, а следовательно,— медленное течение пламени по рабочему пространству колодцев.

6. Для смешения газа и воздуха можно применять головки фиг. 100 или фиг. 101, разница в конструкциях которых понятна из чертежа.

Печи для нагревания слитков.

Как я писал в первой главе, единственной конструкцией, разработанной вполне правильно, является печь Моргана (стр. 21 фиг., 30). Все остальные печи для методического нагревания

топочных газов и ослабляется омывание газами нагреваемых предметов.

Располагая слитки на трубах, при чем под ними остается достаточно высокий канал, ведущий холодные газы к дымовой трубе, мы создаем под слитками подовой, донный поток холодных газов, освобождающий слитки от отработавших газов, тотчас заменяемых горячими газами. Таким путем циркуляция газов в печи получает полную плановую равномерность. Пламя держится под сводом, там заканчиваются реакции горения; затем спускается к слиткам, омывает их, стынет, холодные газы спускаются ниже слитков и удаляются в дымовой пролет.

Сравним эту строго логичную конструкцию с общепринятой системой методических печей.

На фиг. 31 показано движение пламени (керосина) по строго логичной печи Моргана.

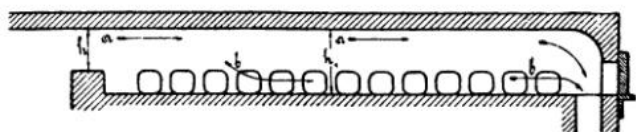
На фиг. 28 демонстрируется мешок остывших газов (вода) в методической печи с восстающим подом и сводом. Очевидно, в данном случае, смена холодных газов горячими—затруднена до последней степени.

Несколько лучше обстоит дело при горизонтальном поде. Мешка не получается, однако на пути подового потока холодных газов расположены слитки, преграждающие ему движение к дымовому пролету.

Соображения об удалении холодных печных газов могут дать основания для расчета ширины пода.

Действительно на практике ширина пода делается почти в два раза больше, чем высота (длина) слитка.

Таким образом по обе стороны нагревающегося слитка остаются широкие каналы.



Фиг. 102.

Какой смысл делать под таким широким? Не лучше ли ширину печи строго пропорционировать с длиной полос или слитков?

Для этого вопроса я не находил ответа до тех пор, пока не подумал о том, что для правильной работы печи жизненно необходимо быстрое и полное удаление из полости ее отработавших газов. Боковые каналы, оставшиеся по обеим сторонам ряда подогреваемых слитков, и есть единственный путь для удаления из печи отработавших газов.

Если мы хотим в конце печи иметь низкую температуру, то нужно эти боковые каналы делать возможно более широкими, что видно из ниже-следующего.

Имеем (фиг. 102) методическую печь с горизонтальным подом и сводом¹⁾, в которой высота пролета над порогом есть высота газослива h , высота окон ниже этой величины, продукты горения отводятся с пода, а потому пламя подпружено и высота свода над подом $h_1 > h$; на поду расположены слитки; возможны два газовых потока— aa под сводом и bb по поду; чтобы попасть в пролет горячему потоку aa надо опуститься на высоту h_1 и затратить на это некоторое гидростатическое давление δ мм воды; потоку же bb надо преодолеть трение о

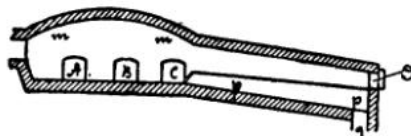
слитки. Ясное дело, что прорыв пламени прямо в пролет возможен в том случае, если сопротивление движения потока $bb—\delta_1$ мм воды будет больше чем δ мм т.-е. когда

$$\delta_1 >$$

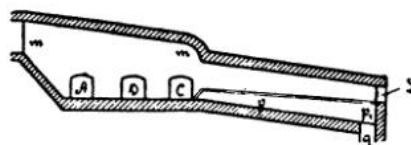
Чем шире печь сравнительно со слитками, тем δ_1 меньше и тем больше оснований для того, чтобы прорыв пламени в дымовой пролет не имел бы места.

Расположив слитки на трубах (фиг. 103 и 104), сделав ступеньку для удобного их кантования перед выдачей, сделав под трубами канализационный канал pp , ведущий в дымовой бороз q , снабдив рабочее пространство понурым сводом с ясно выраженным подсводовым пространством mm , мы получим логично построенное рабочее пространство печи для методического подогрева слитков.

На фиг. 103 и 104 даны два метода остановить пламя и заставить его закончить свои реакции в передней части рабочего пространства.



Фиг. 103.



Фиг. 104.

На фиг. 103 для этой цели сделан выпуклый кверху свод: языки пламени высокой температуры уклоняют пламя кверху и останавливают его последующей понуростью свода.

На фиг. 104 своду дана форма Моргана. Понуростью свод просто тормозит пламя; выпуск пламени в рабочее пространство печи производится очень высоко над подом.

Я полагаю, что оба эти средства остановить пламя и задержать его в передней части печи одинаково хороши.

Однако при этом нельзя делать одной весьма распространенной ошибки: окна A, B, C и D нельзя делать на разных уровнях. Если мы сделаем их на разных уровнях, то вышележащее окно делается дымовой трубой нижележащего окна; через нижележащее окно начнется засасывание холодного воздуха, а через вышележащее будет бить сноп пламени и копоти. Пороги всех окон печи должны быть на одной высоте.

¹⁾ См. также часть II I стр. 32.

В заключение дам две иллюстрации исправленных по моим указаниям дорого оплаченных конструкций шведских печей, построенных на одном из Уральских заводов.

На фиг. 105 дан абрис построенной по купленному чертежу печи. При работе конечно оказалось, что стенка *ab* образует мешок застойных газов и я предложил эту стенку сломать.

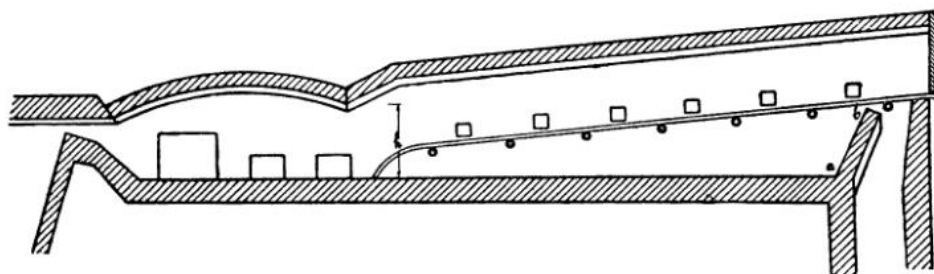
При капитальном ремонте я предложил переделать печь по эскизу фиг. 106.

Другая маленькая подобная печь изображена на фиг. 107 и там же исправленная пунктиром. Исправления имели своим следствием увеличение произво-

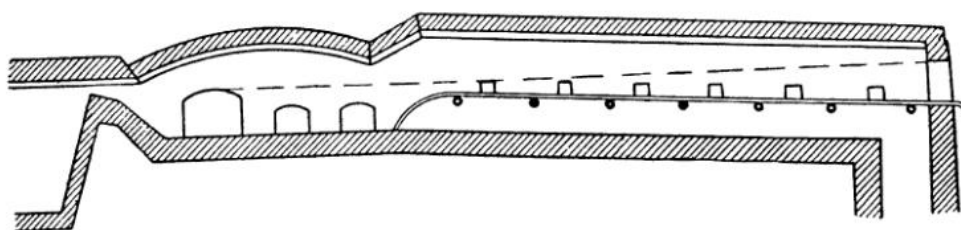
сожигательной камеры, то в пережиге струи в пламенном окне надобности нет.

Если задняя половина свода восстающая, то нередко в своде делается пережим и высота $h = A \sqrt{\frac{Q^2}{B^2 t}}$ (фиг. 105). При понуром своде и подовом потоке холодных газов все эти пережимы излишни.

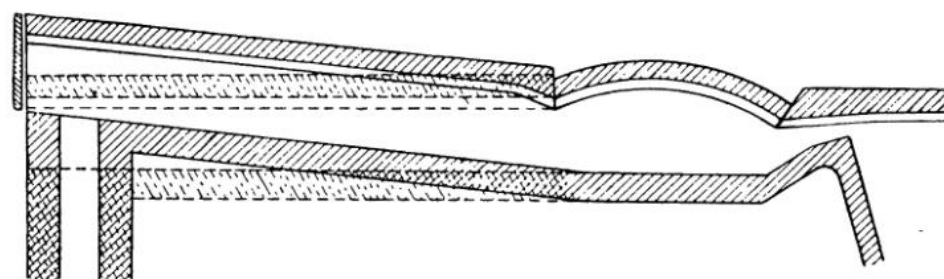
Вообще надо сказать, что понурый свод концентрирует пламя в передней части рабочего пространства; восстающий свод посылает пламя в заднюю часть печи, а потому методические печи надо строить с понурым сводом. Печи для рав-



Фиг. 105.



Фиг. 106.



Фиг. 107.

дительности печи с 700 пуд/24 час. до 920 пуд/24 час. т.е. на 30% при неизменившемся расходе каменного угля.

О форме свода методических печей можно сделать следующие указания:

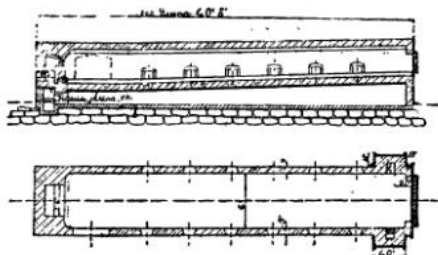
1. Если смесь воздуха и горючих газов в топке подготовлена плохо, то необходим пережим струи в пламенном окне. Его главнейший недостаток возбуждение чрезмерно большой скорости пламени, для уничтожения которой дают сводам специальную форму, как на фиг. 103 и 104. Если подготовка пламени в топке хороша или газы поступают в обширное подсводовое пространство, играющее роль

номерного нагрева очень длинных предметов, например, печи для сварки труб—с восстающим сводом.

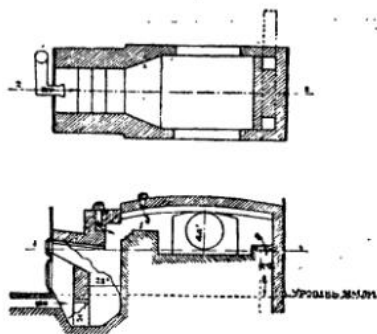
Недостатки современных печей для нагрева стальных слитков сказываются особенно резко на печах для нагрева очень крупных слитков. Перегрев и пережог стали, трещины в отковках суть бедствия, преследующия крупные поковки. Все эти недостатки свойственны в меньшей степени и печам для нагрева мелких слитков, а потому все сказанное о печах для крупных поковок должно применяться и к обыкновенным печам для нагрева стальных слитков.

Заводский опыт учит нас, что при неосторожном нагреве можно испортить материал для поковки и вследствие этого получить весьма плохие результаты механических испытаний; мне было поручено создать тип печей, исключающих возможность перегрева.

Современные нагревательные печи для этого непригодны. Для того, чтобы усилить нагревательную способность этих печей, конструкторы направляют язык пламени прямо на слиток, так же как пламя паяльной трубки направляется на шарик буры. Язык пламени по оптическому пирометру имеет нередко температуру до 1800°C , кроме того несет массу свободного кислорода, а потому, охватывая поверхность слитка, сжигает его поверхность, плавит окалину (1350°C) и не только перегревает сталь, но даже дает пережог стали.



Фиг. 108.



Фиг. 109.

Фиг. 108 представляет методическую печь на нефти, для нагрева слитков дляковки $12''$ бронебойных снарядов, вместо которой я должен был спроектировать новую.

Фиг. 109 представляет полугазовую печь на английском каменном угле для слитков до 1000 пуд., подлежащую замене новой.

На этой фигуре показано расположение такого слитка в рабочем пространстве печи.

Проектируя печи, не способные перегреть сталь, я прежде всего исключил нагрев слитка факелом пламени.

В новых печах реакция горения должна совершаться вдали от слитка. Языки пламени, высокой температуры и богатые кислородом, не должны лизать поверхности металла. Слиток должен нагреваться безкислородными продуктами горения, со-

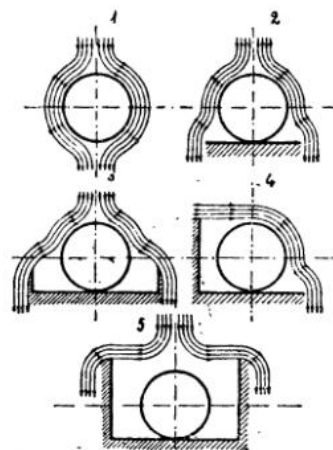
стоящими из CO_2 , N_2 и паров H_2O , с минимальным количеством O_2 , с температурой не выше 1300°C .

Нагрев в печи должен быть мягкий ($1100 - 1200^{\circ}\text{C}$); но окалина не должна плавиться (1350°C); печь не должна быть «сварочной», не должна нагревать до «слезы» т. е. плавления окалины, не должна давать сварочного шлака.

Для того же, чтобы нагревание слитка шло достаточно быстро и равномерно, рабочее пространство нагревательной печи должно быть правильно канализовано.

Вопрос канализации рабочего пространства в современных пламенных печах поставлен совершенно неудовлетворительно и потому я позволяю себе сделать отступление и здесь его рассмотреть.

Представим себе, что мы ввели в атмосферу горячих газов холодный предмет (фиг. 110). Горячие газы, соприкасающиеся с холодной поверхностью этого предмета, остынут, сделаются тяже-



Фиг. 110.

лыми и образуют струйки холодных газов, стекающие вниз. Вместо удалившихся холодных газов к предмету притекают свежие горячие газы и вокруг холодного предмета возникает целый поток газов, им вызванный.

Если положим нагреваемый предмет на под (2), то удаление холодных газов снизу будет затруднено и нижняя поверхность предмета будет омываться газами хуже верхней. Верх слитка будет прогреваться скорее низа.

Если мы поместим слиток в печь, дымовые отверстия, в которой, будут выше пода (3), то низ слитка будет греться еще хуже. Он будет в мешке холодных газов.

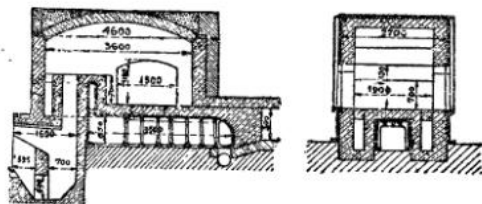
Если мы сделаем у печи очень высокий порог и положим слиток на не канализованный со всех сторон под (4), то струйки будут прогревать только одну сторону слитка.

Наконец, нагревание будет до крайности затруднено при полном отсутствии канализации

пода. Слиток находится в мешке холодных газов и может согреться только лучистой теплотой сверху (5).

Из вышеизложенного следует, что очевидно печь для нагрева должна быть устроена по типу (1) т.е. остывшие газы должны очень энергично убираться с пода печи. В условиях (1), слиток даже в том случае будет нагреваться очень быстро, когда печные газы будут не очень высокой температуры. Но, для получения, в этом случае, хороших результатов необходимо, чтобы реакция горения завершалась где-то вне нагреваемого слитка в наилучшей для реакции горения обстановке, среди раскаленных стенок сожигательной камеры. Перенесение реакции горения в сожигательную камеру даст возможность осуществить горение с небольшим избытком воздуха, получить мягкое безкислородное пламя, без языков высокой температуры. Этим «томильным пылом» можно будет омыть слиток сверху вниз, энергично убирая с пода остывшие газы, во взятые с пода пролеты.

Так именно и была построена печь фиг. 111. Это та же печь фиг. 109, но пламя направлено

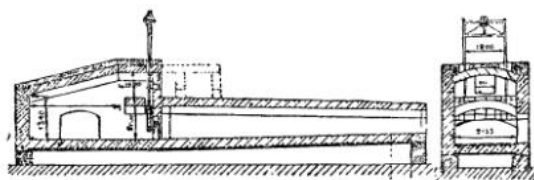


Фиг. 111.

топливо, что дает пламя очень высокой температуры, и моя задача заключалась только в том, чтобы защитить слиток от непосредственного воздействия богатого кислородом факела пламени.

Осуществлено это было перестройкой печи по фиг. 112. Я поднял паровую форсунку во второй этаж и направил ее сзади наперед. Благодаря такому расположению форсунки, пламя распыляемой паром нефти проходило под сводом печи около 3600 мм, ударялось о переднюю стенку печи, поворачивало на 180° и направлялось вдоль рабочего пространства методической печи.

Для того, чтобы такой поворот на 180° мог бы беспрепятственно осуществиться и для того, чтобы реакция горения имела бы достаточное время для получения безкислородного пламени, я поднял свод над подом на 2000 мм. Для того, чтобы прижать пламя к поду, я опустил стенку, отделяющую камеру высокой температуры от остального рабочего пространства методической печи на 700 мм¹⁾. Ниже опустить эту стену было нельзя, ибо слитки во времяковки осаживались вертикально и диаметр их доходил до 600 мм.



Фиг. 112.

прямо вверх, свод поднят на метр выше верха слитка, а с пода взяты пролеты в дымовую трубу. Арматура печи осталась старая. Результаты переделки этой печи превзошли самые смелые ожидания: 1) печь дала настолько ровный нагрев, что в поворачивании слитка во время нагрева нет никакой нужды; 2) окалина на слитке настолько тонка, что не отваливается и выносится на слитке из печи, поэтому в печи не получается сварочного шлака; 3) плавления окалины на слитке никогда не бывает, поэтому не наблюдается и перегрева стали; 4) слиток греется быстро и очень мягко, что особенно оценил персонал рабочих и мастеров у пресса в 1000 тонн, при котором печь поставлена; 5) расход топлива остался прежним.

Рациональное переустройство методической печи фиг. 108 осуществить было гораздо легче. Направляя пламя предыдущей полугазовой печи на свод, увеличивая объем ее подсводового пространства, я боялся понизить температуру печи, боялся не достигнуть в определенной печи температуры слитка в 1200°C, нужной дляковки.

При переделке печи на нефть (фиг. 112) эта боязнь у меня отпала. Нефть такое великолепное

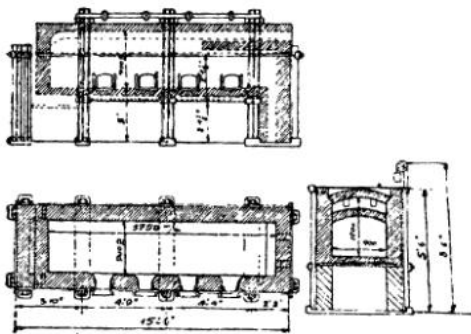
Но так как я боялся, что пламя оторвется от пода, то я показал на чертеже, собранный из труб, охлаждаемых водой ставень, который однако поставлен не был. Оставляя один слиток в окне, отделяющем камеру высокой температуры от камеры низкой температуры, окно это рабочие стесняли так, что пламя «лизало под» и в передней камере высокой температуры.

Печь пошла хорошо: при том же расходе нефти производительность печи возросла; слитки нагревались мягко и ровно; плавления окалины не наблюдалось; тонкий слой окалины выносился всегда на слитке и отваливался только под молотком; сварочного шлака не получалось. Позже выяснился существенный недостаток этого расположения паровой форсунки, а именно: паровая форсунка оказывается столь слабо инжeksiрующим воздух аппаратом, что держать положительное давление на поду печи оказывается затруднительным и я в настоящее время отказался от установки паро-

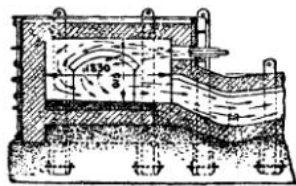
¹⁾ С гидравлической точки зрения эту стенку надо назвать «перевалом» или «перевальной стенкой», соответственно перевалу в плотинах.

вых форсунок, под сводом печей. Подобная конструкция применяется мною только к форсункам, работающим от вентилятора, ибо эти форсунки не получают нужный им воздух путем засасывания через щель вокруг форсунки. Этот успех подтолкнул меня применить идею поставить форсунку во второй этаж, и сделать печь с очень высоким сводом и в печи для нагрева заготовок для снарядов в Пермских пушечных заводах.

Печь мною была оставлена в ее старой арматуре (фиг. 113). Свод был поднят до высоты 1 м над подом. Было поставлено две форсунки на дутье в 1" ртути. Пламя их должно было пролететь под сводом 3750 мм и завернуться на 180°, так как дымовые пролеты были сделаны на поду со стороны форсунок. Но оказалось, что для такого поворота на 180° высота свода над подом в



Фиг. 113.



Фиг. 114.

в 1000 мм мала. Горн. инж. Н. В. Попов ввел поправку в чертеж этой печи, сделав второй сводик под форсунками, чем корректировал пламя форсунок, сделав его широким и плоским.

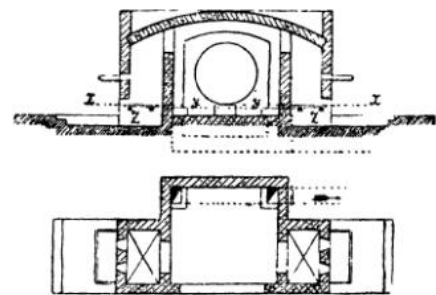
Печь пошла хорошо и все печи прессовой фабрики Пермских пушечных заводов начали постепенно переделывать по типу этой печи.

Печи этой конструкции были пущены в Путиловском заводе в августе 1914 года, в Мотовилихе в октябре, а в ноябре 1914 г. в *The Iron Trade Rev.*, стр. 1000, была опубликована печь фирмы *Washington Iron Works Co*, изображенная на фиг. 144 (*Ж. Р. М. О.* 1914, стр. 654). Я не думаю, чтобы опубликованные размеры печи были верны, но очевидно, что идея печи у меня и у американского изобретателя была одна и та же.

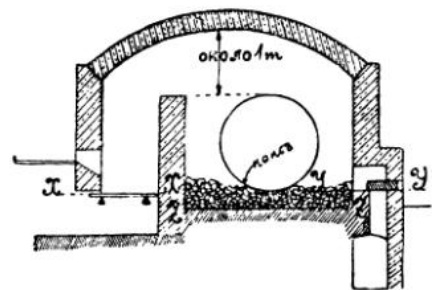
Таким образом вопрос о рациональной конструкции печей для нагрева как крупных слитков,

так и мелкой заготовки был решен. Посмотрим как решают этот вопрос лучшие заводы Европы.

В печи для нагрева очень тяжелых (100 тн) слитков завода Крез во Франции (фиг. 115) пламя пущено прямо на слиток. Уровень колосников *xx* сделан выше уровня пода и так как печь самодувная, то на поду естественно получается отрицательное давление. Под слиток через все щели сосет воздух, низ слитка стынет и во избежание этого на под печи подбрасывают кокс; этим путем подогревают низ слитка. Дымовые отверстия берутся выше пода с уровня *yy*, чем предупредили попадание в них при загрузке кокса, но устроили на поду мешок холодных газов, подогреваемых коксом. Равномерный нагрев слитка достигается его поворачиванием, но при ковке трещины достаточно.



Фиг. 115. 1).



Фиг. 116.

Как исправить эту печь? Конечно,—поднять свод, опустить на метр колосники, на поду сделать целый ряд дымовых отверстий от уровня пода. Наконец,—использовать теряющийся жар для подогрева воздуха и тем сократить невероятный расход топлива в этом типе печей.

Печь *Джона Брауна* в Шеффилде (фиг. 116) совершенно подобна печи Крез, но повышено подсводовое пространство до 1 м; уровень колосников *xx* выше уровня пода *zz*; уровень дымовых отверстий *yy* тоже выше пода, как в Крезе; дымовые отверстия расположены только с одной стороны. При нагревании слитка на под засыпают

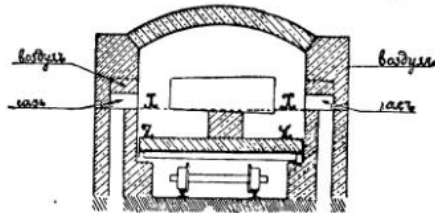
1) Все эскизы сделаны мной от руки на память, ибо чертеж этих печей представляет тщательно охраняемый секрет (!).

кокс, кроме того слиток поворачивают. При ковке на слитке оказывается много трещин.

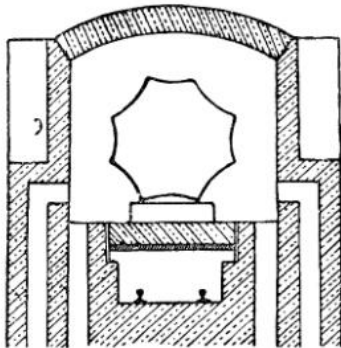
Недостатки этой печи те же, что и в печи Крезо. В таком виде эта печь конечно неудовлетворительна.

Печь Сименса завода Армстронга и Витворта в Шеффилде (фиг. 117). Пролеты направлены прямо на слиток; низ слитка купается в мешке холодных газов, ибо уровень пода z ниже уровня головок.

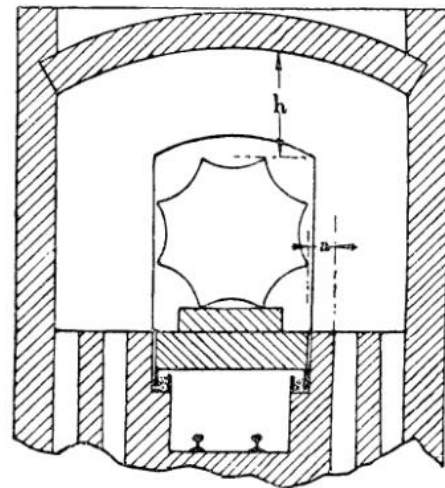
Печь Сименса завода Виккерса в Шеффилде (фиг. 118) лучше предыдущей, ибо воздушные пролеты взяты с пода печи, чем уничтожен



Фиг. 117.



Фиг. 118.



Фиг. 119.



Фиг. 120.

мешок холодных газов на поду. Газовые пролеты следовало бы тоже сделать на уровне пода и направить вверх, т.е. дать печи конструкцию фиг. 119.

Чем больше будет сделан нами размер a и высота h , тем спокойнее и ровнее будет нагрев слитка.

В заключение я должен сказать, что среди инженеров наблюдается совершенно неосновательный страх за крупные поковки. Конечно, отлить слиток для крупной поковки задача трудная, но раз слиток отлит хорошо, в нем нет трещин, нет значительной ликвации и усадки, то ковка слитка является операцией совершенно безопасной. Конечно нельзя уводить ковкой ликвационную зону

с ее осевого положения; проектковки должен считаться с неизбежностью ликвационной зоны, он должен предусмотреть ее распределение в готовой поковке. Но если за всем этим, печи для нагрева слитков не имеют недостатков печей Круппа, Крезо, Джона Брауна, Армстронга, Виккерса и многих других заводов, а построены логично, то можно смело браться за исполнение каких угодно поволоков с твердой верой в успех.

Резюмируя все сказанное о печах для нагрева слитков мы должны для этих печей поставить три нижеследующих требования:

1. Реакция горения должна совершаться вне нагреваемого слитка и слиток должен быть обогреваем продуктами горения, а не факелом пламени.

2. Для быстроты нагрева под, на котором подогревается слиток, должен быть хорошо канализован.

3. К этим двум пунктам надо прибавить, что подъем температуры слитка не должен быть резок, а потому для нагрева слитков особенно хороши методические печи.

Коридорные печи.

Несмотря на заманчивость коридорных печей, их редко строят, ибо они редко удаются, вследствие ошибочности своей конструкции.

На фиг. 120 представлен эскиз печи Грэндаля для обжига брикетов.

Середина печи имеет приподнятый свод, где развивается пламя генераторного газа поступающего через щель в своде O . Генератор на дутье;

воздух доставляется тоже вентилятором через щель в своде P и дым удаляется через щель Q , тоже через свод. Пламя в печи течет под сводом; для того, чтобы прижать его к поду, делаются опускающиеся со свода заслонки s_1 и s_2 ¹⁾.

Заставляя двигаться пламя по кладке брикетов, мы увеличиваем сопротивление движению газов; приходится увеличивать давление дутья под колосники генератора и в печь, и повышать дымовую трубу. Однако такому повышению упругости дутья препятствует малая герметичность песчаного затвора, который очень трудно держать в порядке в условиях печи Грэндаля.

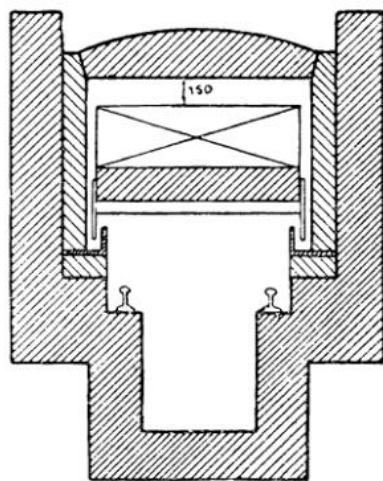
Из этого затруднения последний выходит, вдвывая отдельную струю воздуха под вагонетки, якобы для их охлаждения. Этот дополнительный воздух

изобретатель стал грузить на вагонетки только по два ряда кирпичей.

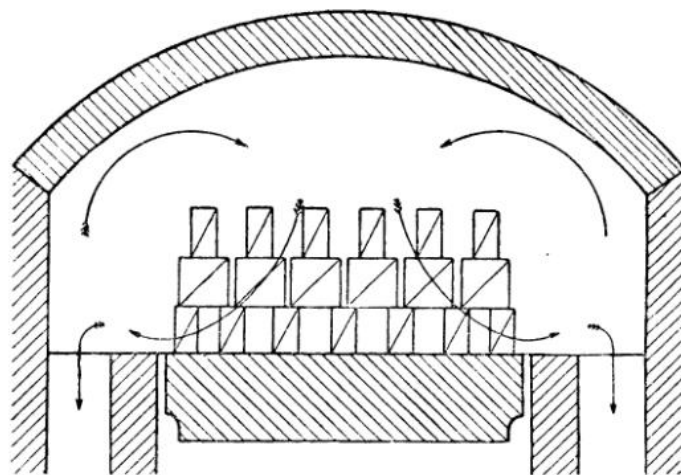
Я полагаю, что в решении вопроса о коридорных печах, мы должны стоять на совершенно другой точке зрения. Гнать пламя по решетке брикетов протяжением в 50 м не следует. Выгоднее греть брикеты нисходящими потоками горячих газов.

Разность в методах работы — осуществленной Грэндалем и предлагаемой мной — видна из сопоставления поперечных сечений коридорной печи Грэндаля и мною исправленной (фиг. 121 и 122).

Грэндаль (фиг. 121) делает прямой свод на расстоянии 150 мм от верха нагруженных в два ряда брикетов; прижимая пламя к брикетам, заставляя его проходить их толщу, он вместе с тем отводит пламя через свод.



Фиг. 121.



Фиг. 122.



Фиг. 123.

вероятно проникает в полость печи, отжимая пламя от брикетов к своду, следствием чего явилась необходимость увеличить длину коридорной печи для обжига брикетов с 50 до 70 м длины.

В устройстве коридорных печей Грэндаль делает явную ошибку, отводя дым сверху. Этим путем он погружает весь поезд брикетов в мешок холодных газов. Эта ошибка очевидна.

Другая его ошибка состоит в стремлении заставить пламя пройти через решетчатую кладку брикетов во всю длину коридора. Эта задача очень трудно осуществимая и, чтобы обеспечить себя,

Я полагаю, что на вагонетку нужно грузить столько рядов брикетов, сколько будет удобно по условиям их производства. Показываю их на фиг. 122 три ряда.

Делаю коридор гораздо шире вагонетки, свод поднимаю над верхним рядом брикетов на такую высоту, чтобы все пламя шло под сводом. Благодаря ширине печи сбоку брикетов, получается два подовых потока, которые отводятся вниз в дымовые пролеты.

Движение омывающих брикеты газов сверху вниз показано стрелками.

Кроме того, чтобы осуществить и в продольном направлении движение печных газов сверху вниз, а движение нагреваемого воздуха снизу вверх, я изгибаю прямой коридор Грэндаля по дуге круга выпоклостью вверх, как показано на фиг. 123.

¹⁾ Кроме того имеются еще заслонки s_3 и s_4 претендующие повидимому способствовать лучшему нагреванию воздуха, но очевидно не имеющие смысла, ибо холодный воздух сам по себе всегда идет понизу, а потому, прижимать его к поду нет никакой нужды.

Так построенная печь не будет нуждаться в дутье: превышение средней части печи (камеры горения) над устьем печи, в которое вступает холодный воздух, создает гидростатическое давление, достаточное для преодоления сопротивлений движению воздуха по широкому коридору, в котором движется поезд вагонеток. С другой стороны пламя,

развившееся в камере горения, будет спускаться вниз, нагревая брикеты тягой дымовой трубы, ибо сопротивление опять-таки широкого коридора не велико.

Я полагаю, что так исправленные коридорные печи могут работать вполне удовлетворительно.

ГЛАВА III.

Основной принцип устройства безопасных газопроводов.

Обезопасить газопроводы представляется задачей не трудной, если встать на ту точку зрения, что теплый генераторный или доменный газ есть легкая жидкость, окружающий же его воздух есть жидкость тяжелая. Во время перерывов в работе, например, при засыпке в домну калаш, холодный воздух, как тяжелая жидкость, может войти в горелку доменного газа, выдавить газ из части газопровода через другие горелки или через колошник доменной печи, и образовать в газопроводах взрывчатую смесь, последствием чего будут хлопки или взрывы.

Мерами предосторожности против взрывов может быть, с одной стороны, уход за газопроводами, например, закрытие клапанов горелок при каждой засыпке, или же, с другой стороны, разработка такой конструкции газопроводов, которая сама по себе давала бы гарантию в том, что взрывов при эксплуатации газопровода не будет.

Из моей многолетней заводской практики я вывел твердое убеждение в ошибочности расчетов на уход и аккуратность рабочих. Это способ дорогой и ненадежный. Устройство должно отвечать само за себя, без всякого досмотра и ухода.

Правила этого устройства газопроводов я предлагаю вниманию читателя. Они очень элементарны, очень просты, как все приложения гидравлики к печам. Тем не менее, случаи нарушения их чрезвычайно часты, ибо о них, просто, не думают.

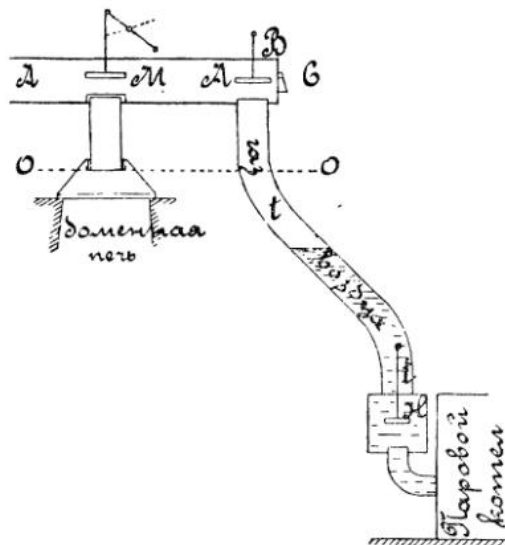
Правила о предупреждении несчастных случаев предписывают такое устройство газопроводов, чтобы давление в них всегда было бы выше атмосферного. Поэтому, если на фиг. 124 мы имеем колошник доменной печи, прикрытый обыкновенной крышкой, и газопровод AA' к паровым котлам, то давление доменного газа в горелке парового котла должно быть не ниже атмосферного, скажем — равно нулю. Давление в трубе AA' будет, конечно, гораздо выше атмосферного.

Приняв вес 1 м^3 доменного газа при 0° равным $1,22 \text{ кг}$, температуру доменного газа в 200° ,

высоту трубы AA' над горелкой парового котла в 23 м , мы найдем гидростатическое давление доменного газа в трубе AA' равным:

$$\delta = 23 \left(1,29 - \frac{1,22}{1 + \frac{200}{273}} \right) = 23,0,585 = 13,45 \text{ кг/м}^2$$

или $13,45 \text{ мм}$ воды.



Фиг. 124.

Из сказанного следует, что, пока крышка на домне закрыта, на всем пути между доменной печью и горелкой паровых котлов (фиг. 124) давление доменных газов — выше атмосферного и никакой опасности в засасывании воздуха на этом пути не существует. Напротив того, как только мы откроем крышку на домне, то часть доменного газа из газопровода может быть выдавлена воздухом через неплотности клапана M ; воздух, как тяжелая жидкость, заполнит газопровод через горелку, как заштриховано на фиг. 124.

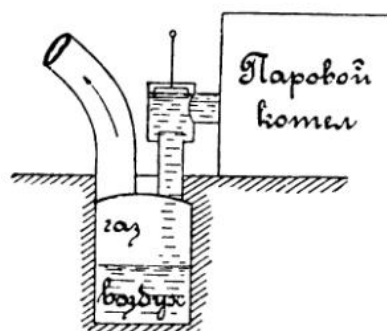
Весь ли доменный газ уйдет в этом случае из газопровода? Конечно, не весь; воздух не может подняться выше уровня линии OO' ; на практике

он остановится несколько ниже, ибо доменный газ в колене *tt* холоднее, чем у самой домны.

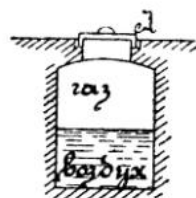
Когда крышка домны будет олушена, начнется обратное вытеснение воздуха доменным газом и, если общее направление газопровода вертикально, то воздух спокойно вытеснится сверху вниз через горелку; а когда придет газ, он спокойно загорится. Что это так, я убедился на примере пуска доменного газа к котлам в Нижне-Тагильском заводе в 1895 году. Там было принято, чтобы при пуске газа воздух вытеснялся только из квадратной трубы *AA* через клапан *C*. Из трубы *tt* воздух вытесняли через горелки, для чего просто поднимали клапан *B*; взрывов никогда не происходило; конечно, такой способ пуска газа в котлы должно считать риско-

Сравним между собой фиг. 124 и 125. Сделано небольшое конструктивное изменение и безопасная конструкция (фиг. 124) сделалась очень опасной (фиг. 125).

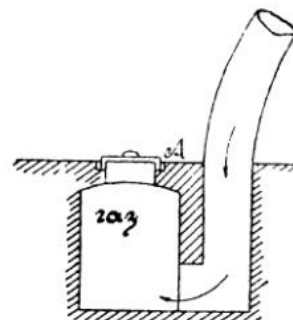
Положительное давление в газопроводе на уровне горелки не всегда гарантирует положительное давление во всех частях газопровода. Подобный пример в моей практике был в Н.-Алапаевском заводе (фиг. 126). Группа генераторов *A* была присоединена к газовому коллектору *B*, а из него газ проводился очень длинным боровком *CC* в листокальные печи и печь Сименса для нагрева слитков. Устройство это давало такие взрывы, что подземный боровок был оставлен и заменен подземной железной трубой.



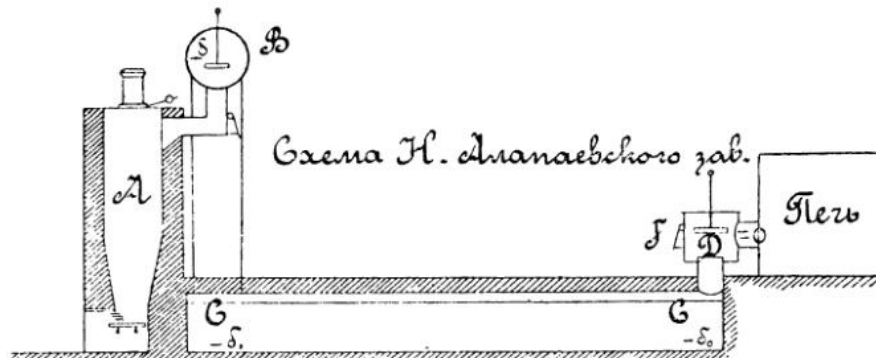
Фиг. 125.



Фиг. 127



Фиг. 128.



Фиг. 126.

ваным. С течением времени автоматическое прикрытие клапана *M* было упразднено и котлы работали на доменном газе, при чем воздух во время каждой засыпи входил в газопроводы, а затем вытеснялся в топку.

Почему не было взрывов? Ответ совершенно ясен: легкий газ имел во всех частях газопровода направление движения сверху вниз и вытеснял тяжелый воздух вниз, с ним не смешиваясь.

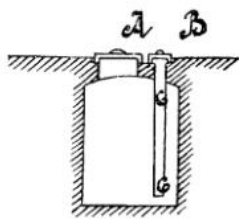
Если бы перед впуском в котлы была бы придана конструкция фиг. 125, т.е. газу перед входом в котлы было бы дано направление снизу вверх, то при заполнении боровка тяжелым воздухом получалась бы смесь газа и воздуха, которая при обратном движении в топку дала бы взрыв.

Взрывы прекратились. Тут мы имеем случай, когда давление, равное нулю в горелке, не гарантирует положительного давления во всем газопроводе. И в самом деле, если в горелке давление равно нулю, то у дна боровка оно будет отрицательно ($-\delta_0$ и $-\delta_1$) и через трещины в кладке боровка делается возможным засасывание воздуха. Но взрывы во время работы печей были сравнительно редки. Очень опасные взрывы были при пуске генераторов в ход. Причина этих взрывов совершенно ясна. Для выпуска взрывчатой смеси из подземных боровков применяются обыкновенно песчаные клапаны типа фиг. 127.

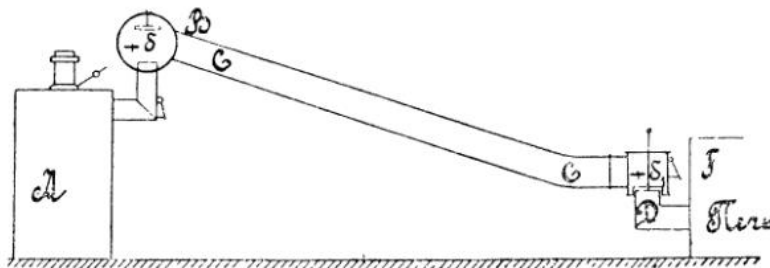
Совершенно ясно, что такой клапан взрывчатую смесь из газопровода удалить на воздух не может:

на дне боровка всегда останется слой воздуха, как тяжелой жидкости.

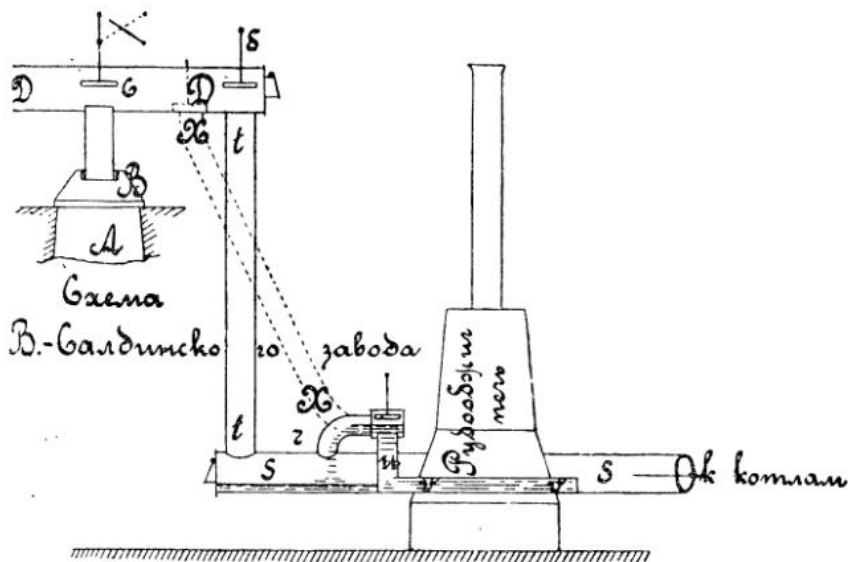
Если боровок короток, то делу может помочь подвод газа снизу (фиг. 128); при длинных же подземных боровках клапан для удаления взрывчатой смеси должен иметь специальную конструкцию (фиг. 129) при которой взрывчатая смесь может быть выдвинута газом с пода боровка. Здесь, кроме обыкновенного предохранительного клапана *A*, помещен еще специальный клапан *B* с трубой *ce*, немного не доходящей до дна боровка, который служит для вытеснения на воздух взрывчатой смеси с пода боровка. Таких клапанов обыкновенно не



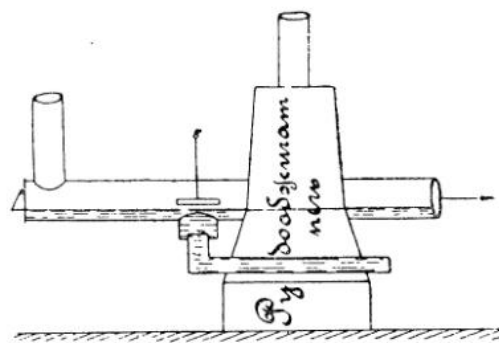
Фиг. 129.



Фиг. 130.



Фиг. 131.



Фиг. 132.

яснявшим тягу генераторов действием «сифона». Если в горелке давление равно нулю, то во всех частях газопровода (фиг. 130) давление выше атмосферного, и он совершенно обезопасен от взрывов. Вытеснение воздуха из газопровода через клапан (фиг. 130) идет сверху вниз, т.е. в условиях чрезвычайно благоприятных; смешения газа и воздуха не происходит, почему и взрывов не бывает.

После постройки рудообжигательной печи Вестмана, в Верхне-Салдинском заводе, каждая засыпка калоши в домну сопровождалась взрывом. Схема газопроводов показана на фиг. 131. Домна *A* прикрывалась крышкой *B*, прижимающей автомати-

делают, ибо совсем не задаются мыслью, как выдвинуть со дна боровка тяжелый холодный воздух. Вот причина, почему длинный подземный боровок рисуется в глазах инженеров, как устройство нежелательное и несколько опасное в отношении взрывов.

Кроме завода Н.-Алапаевского, Н.-Шайтанского, об устройстве боровков коих писано выше, взрывы в подземном боровке были наблюдаемы мною в Н.-Салде у аппаратов Каупера. От взрывов мы избавились энергичным продуванием боровков паром из специально устроенного паропровода.

Вместо подземных боровков очень часто делают надземные железные трубопроводы, (фиг. 130). Устройство их предложено еще Сименсом, об-

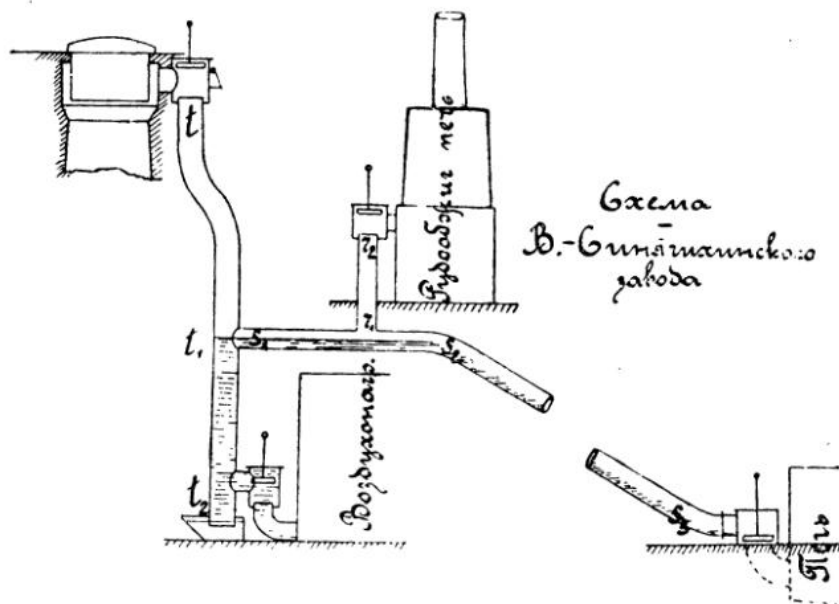
чекски клапан *C*. Доменный газ направлялся трубой *DD*, *tt* и *SS* к паровым котлам. По пути от трубы *SS* был взят патрубок *r*, который отводил часть газа по газопроводу *u* и *vv* к горелкам печи Вестмана. До постройки печи Вестмана взрывов не бывало, и автоматический клапан *C* был заброшен и при опускании крышки не запирался.

Причину взрывов был очевидно воздух, входивший в горелки газопровода *vv* и в патрубок *u*; затем он частично выполнял патрубок *r* и падал на дно пятифутового газопровода *SS*, образуя взрывчатую смесь.

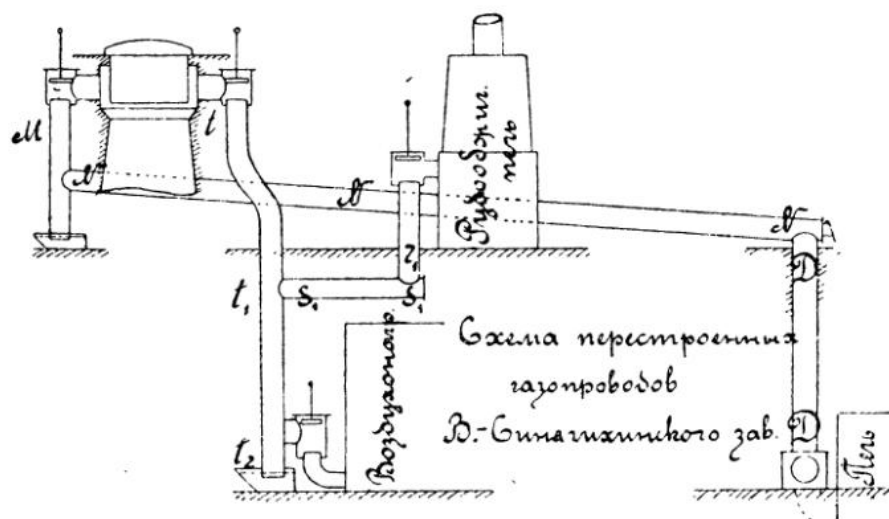
Чтобы избежать взрывов, пришлось восстановить автоматический клапан *C*, но полного исчез-

новения хлопков мы все-таки не достигли. Значительно улучшить положение дела можно было бы методом взятия газа от газопровода. Фиг. 132 давала бы лучшую гарантию безопасности, но радикальное улучшение произошло бы, если бы рудообжигательная печь была бы снабжена отдельным газопроводом XX, указанным на фиг. 131 пунктиром, или газопроводом, взятым от вертикальной трубы II.

При каждой засыпи калоши на доменной печи в листокатальной печи был взрыв. Очевидно, что во время засыпи рудообжигательная печь высасывала из газопровода газ; холодный воздух входил в горелку воздухонагревателя, выдавливал газ из части вертикальной трубы $t_1 t_2$, распространялся по трубе $S_1 S_2$ и, попадая вниз по трубе $S_2 S_3$, давал смесь с газом. По окончании засыпи калоши газ обратно выдавливал воздух в горелку воздухонагре-



Фиг. 133.



Фиг. 134.

Если газопроводы очень длинные, а потребители доменного газа находятся на различных горизонтах, то вопрос о безопасном устройстве газопроводов принимает особую остроту.

На (фиг. 133) схема газопроводов В.-Синячинского завода. Потребителями доменного газа были: воздухонагреватель, рудообжигательная печь, установленная на плотине завода на 6—7 метров выше воздухонагревателя, и листокатальная печь, поставленная в сажнях 50 от доменной печи.

вателя, смесь же, образовавшаяся в трубе $S_2 S_3$, попадала в горелку листокатальной печи и давала взрыв.

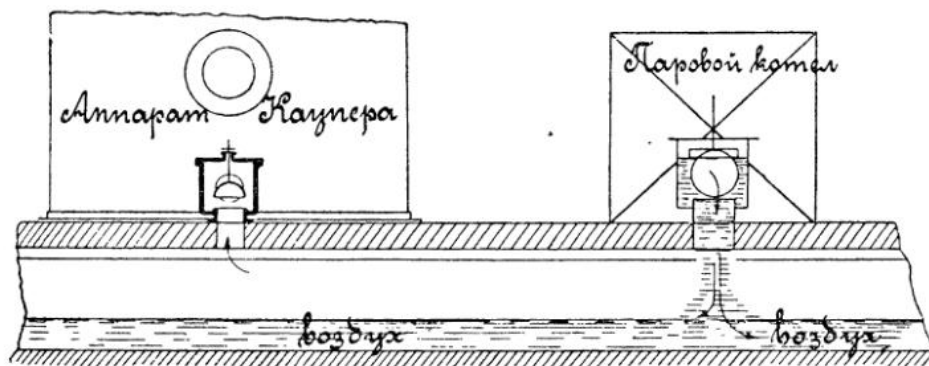
Газопроводы были перестроены (фиг. 134). От доменной печи был взят другой патрубок и устроен для листокатальной печи свой газопровод $MNND$. Взрывы, конечно, прекратились. Конечно, было бы логично перестроить газопровод к рудообжигательной печи $S_1 S_1 t_1$, уничтожив восстающее колено t_1 , но этого сделано не было, ибо эта часть газопровода нас мало беспокоила.

В схеме фиг. 133 во время засыпки калаш газ выдавливался воздухом из газопровода через рудобжигательную печь. Патрубок $r_1 r_2$ являлся, так сказать, дымовой трубой всех газопроводов В.-Синячихинского завода благодаря тому, что рудобжигательная печь поставлена выше воздухогревателя и листокатальной печи.

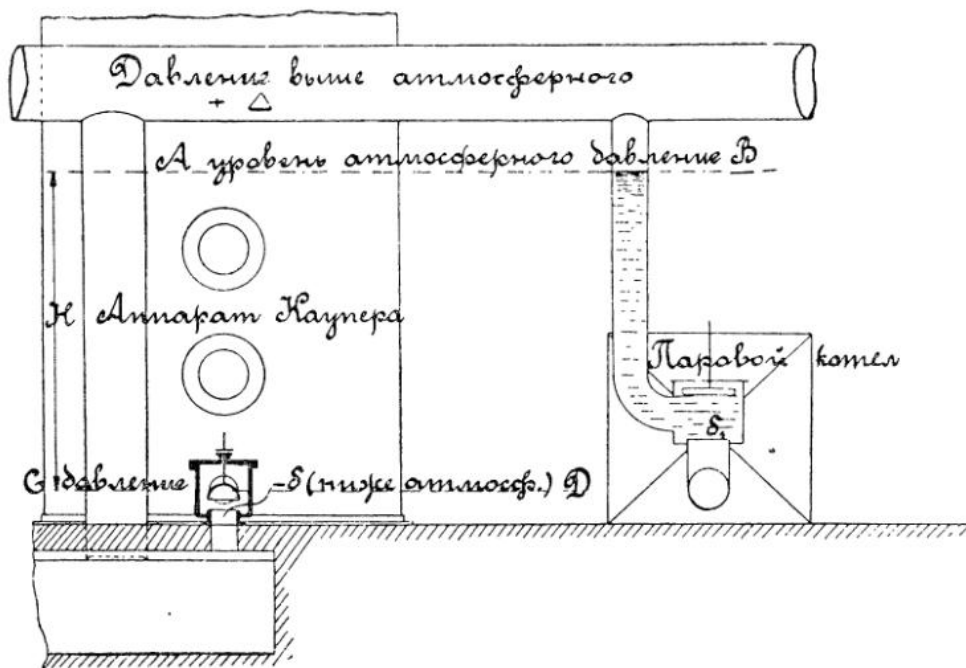
Но совершенно очевидно, что такое же явление можно получить и в том случае, когда потребители доменного газа расположены на одном уровне, но устройство газовых топок их разного характера.

разрежением в сожигательной камере, то, очевидно, во время засыпки калаша на доменной печи, воздух через горелки паровых котлов войдет в газопроводы и выдавит газ из газопровода в аппараты Каупера.

Такое вытеснение газа из газопроводов может обходиться благополучно и неблагополучно, в зависимости от того, как устроен газопровод. Фиг. 135 дает пример чрезвычайно опасного устройства фиг. 136 — устройства тем менее опасного, чем выше газопровод над полом и чем горячее газ. На



Фиг. 135.



Фиг. 136.

Горелка доменного газа может быть такого большого диаметра, скорость входа доменного газа в топку так мала, что в полости топки может существовать почти атмосферное давление. Такие топки очень часто устраиваются у паровых котлов, работающих доменным газом. Если рядом с группой таких котлов поставить аппарат Каупера, который пропорционируется с очень маленькими клапанами и большими скоростями доменного газа и воздуха, а потому работает с очень большим

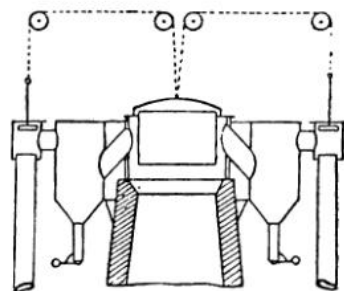
фиг. 136 разрежение ($-\delta$), господствующее в камере горения аппарата Каупера, должно быть уравновешено разрежением, которое способно дать столб теплого легкого газа H .

Если линия AB не поднимается выше низа газопровода, то устройство газопровода будет совершенно безопасно, и хлопков в газопровode никогда не будет.

Если же мы хотим иметь совершенно безопасное устройство, так сказать, идеал безопасности,

то, конечно, для каждой группы потребителей нужно прямо от домны устраивать свой газопровод. Подобное устройство указано эскизно на фиг. 137.

Здесь вокруг колошника устроена кольцеобразная камера для улавливания колошниковой пыли, механически удаляемой через спускные люки; от



Рекомендуемая схема

Фиг. 137.

стенок этой камеры можно взять столько газопроводов, сколько разнородных потребителей доменного газа мы имеем. Например, кауперовские аппараты, рудообжигатели, котлы, аппараты для очистки и потребления доменного газа на различные надобности, как-то: газомоторы, печи и т. п. В

пылеосадительной камере на уровне колошника царствует всегда давление выше атмосферного, а потому, если все газопроводы будут направлены сверху вниз, то ни малейшей опасности взрыва в этих газопроводах не будет.

Суммируя все описанные случаи неудачного расположения газопроводов, мы можем вывести нижеследующие правила проектирования безопасных газопроводов.

1. Не следует соединять общим газопроводом устройства, работающие при различных условиях тяги и разнохарактерные по своему назначению, или расположенные на различных уровнях. Всякое такое устройство или группа устройств должны иметь свой газопровод, начинающийся от такого места газоулавливающего прибора или газопровода, где никогда не бывает отрицательного давления (ниже атмосферного).

2. Направление движения газа в газопроводах должно быть нисходящим. Восстающего направления надо избегать.

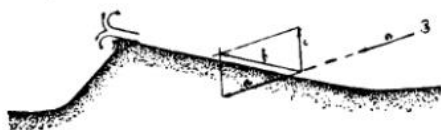
3. При длинных газопроводах их лучше делать с падением в сторону движения газов.

4. Устройства для продувки взрывчатой смеси должны брать смесь из самой низкой части газопровода.

ГЛАВА IV.

Основной принцип правильного устройства пылеуловителей.

Так как доменный газ выходит из домны при температуре 200° — 400° С и отделяется от колошниковой пыли при этой температуре, то к газоочистителям должны быть приложены принципы движения горячих газов. В действительности принципы эти в заводах часто нарушаются и, так называемые, сухие очистители работают весьма неудовлетворительно.



Фиг. 138.

Между тем, практика дает указания, что задача очистки газа от колошниковой пыли—задача разрешимая. Мы имеем многочисленные указания на то, что длинный горизонтальный газопровод прекрасно очищает газ от пыли. Специально же устроенные вертикальные очистители отделяют только подрудок. Почему? Вот вопрос, на который надо дать простой и ясный ответ.

В природе мы встречаем обширные пылевые отложения. Таковы дюны, барханы и отложения леса. Железнодорожная техника изобрела прекрасный способ защиты железнодорожного полотна от снежных заносов при помощи деревянных решеток, скопляющих по сторонам полотна отложения снега в несколько аршин толщиной.

Из сказанного ясно, что природа обладает могущественным средством для отделения газа от пыли, и мы должны только умело воспользоваться этим средством.

Рассмотрим процесс передвижения дюн: струя ветра a (фиг. 138) ударяет о поверхность дюны и, поднимая песчинку с весом c , принимает направление b . Достигнув вершины дюны, струйка b ударяется о неподвижный воздух, и скорость ее превращается в два вихря—верхний и нижний, которые продолжают движение струйки b , но с небольшой скоростью.

Под влиянием центробежной силы песчинки выходят из сферы вихря и падают вниз, образуя угол естественного откоса подветренной части дюны.

Иногда, под влиянием нижнего вихря, дюна получает ясно выраженный карниз.

На фиг. 139 дана схема работы железнодорожной решетки для защиты пути от снеговых заносов.

Задача устройства этой решетки—осадить снег, увлекаемый ветром.

Решетка выполняет двойную роль:

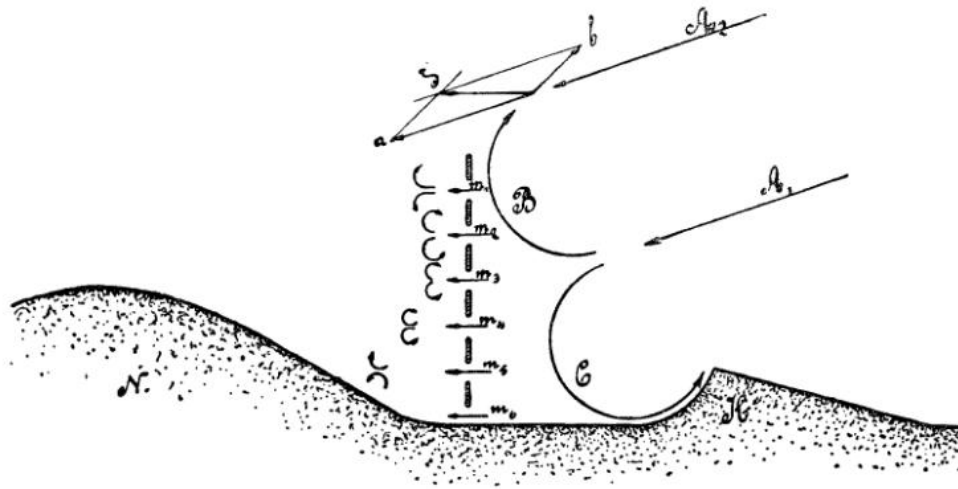
а) Она работает, как обыкновенное препятствие движению ветра, как сплошной забор.

б) Она работает, как сито.

маленькие вихри и отделят от себя снежинки, которые упадут вниз и образуют мощное отложение N .

Газоочистители.

Итак, природа учит нас, что в дюнах и в железнодорожных решетках отделение пыли от воздуха производится уничтожением горизонтальной скорости поступательного движения и превращением ее в скорость движения вихревого.



Фиг. 139.

Рассмотрим результат воздействия на метель сплошного забора.

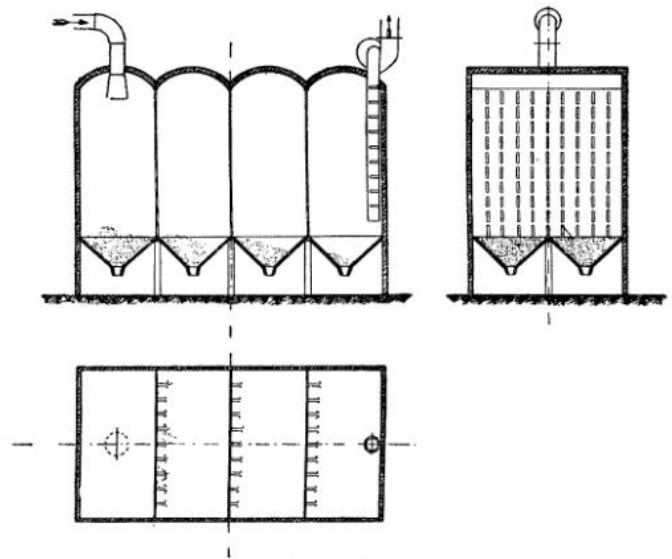
Если A_1 , A_2 — струи ветра, то при встрече струи A_1 с забором она породит два вихря: верхний B и нижний C .

Нижний вихрь C дает перед решеткой небольшой надув K , как результат своей встречи со струей вдоль почвы.

Вихрь B складывается со струей A_2 и уклоняет ее кверху, как видно из параллелограмма abd . Снег, несомый вихрем B и струей A_2 , переносится через забор. Вот причина, почему железные дороги давно отказались от сплошных заборов и делают решетки.

Всякое препятствие, поставленное на пути воздушной струи A_1 , уничтожая ее скорость, превращает эту скорость в давление; отсюда ясно, что если в препятствии будут щели, то через эти щели устремится с большою скоростью воздух, и вихри B и C ослабятся. Таким путем, поставив на пути струи A_1 решетку, мы большую часть струи A_1 преобразуем в мелкие струйки $m_1, m_2, m_3, m_4, \dots$, разделенные между собой пространствами с неподвижным воздухом, соответствующими доскам решетки.

Мелкие струйки m_1, m_2, m_3, \dots , ударяясь о неподвижный воздух за решеткой, превратятся в



Фиг. 140.

Этим явлением можно воспользоваться для устройства газоочистителя. На фиг. 140 изображен газоочиститель, состоящий из ряда камер, разделенных стенками, в которых сделаны узкие щели, превращающие поступательное движение в вихревое, следствием чего является осадка пыли.

Такие же результаты мы можем получить, замедлив движение газовой струи настолько, что пыль, под действием силы тяжести, опустится на дно газоочистителя.

Самым простым газоочистителем такого типа является длинный горизонтальный газопровод с отводом газа сверху, и настолько большим сечением, что газ не заполняет всего сечения (фиг. 141). При этом на дне газопровода получается мешок холодных газов, в котором может осесть самая тонкая пыль.

Предположим, что по газопроводу (сечением $0,7 \times 1,0$ м)¹⁾ течет $0,5$ м³ газа в секунду, нагретого до 300°C .

Высота газослива будет:

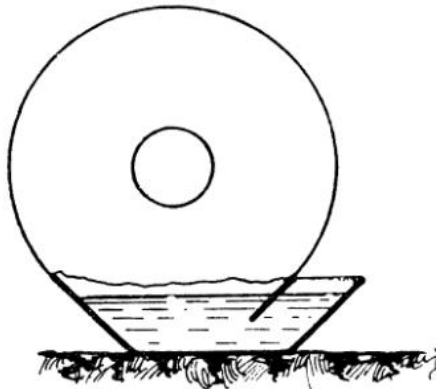
$$h = 3,69 \sqrt[3]{\frac{0,5^2}{0,7^2 \cdot 300}} = 0,45 \text{ м.}$$



Фиг. 141.



Фиг. 142.



Фиг. 143.

Скорость газовой реки:

$$v = \sqrt{\frac{0,45 \cdot 300}{3,69^2}} = 1,64 \text{ м/сек.}$$

Но мы имеем все средства понизить эту скорость и увеличить время пребывания газа в трубе, подпрудив газовую реку, подобно тому, как показано на фиг. 142. Сделаем высоту перевальной стенки $0,30$ м.

¹⁾ Здесь приведен пример расчета прямоугольного газопровода, т. к. высота газослива, ограниченного сверху окружностью, благодаря отсутствию опытных коэффициентов, не поддается расчету.

Высота газослива в этом случае будет:

$$h = 3,17 \sqrt[3]{\frac{0,5^2}{0,72 \cdot 300}} = 0,38 \text{ м.}$$

Сечение подпруженной газослива будет:

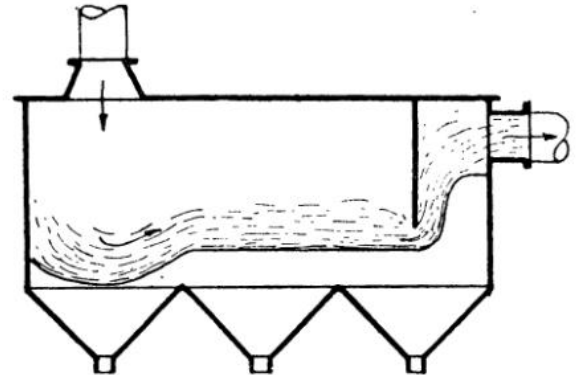
$$\omega = (0,30 + 0,38) \cdot 0,70 = 0,476 \text{ м}^2.$$

Скорость газовой реки будет:

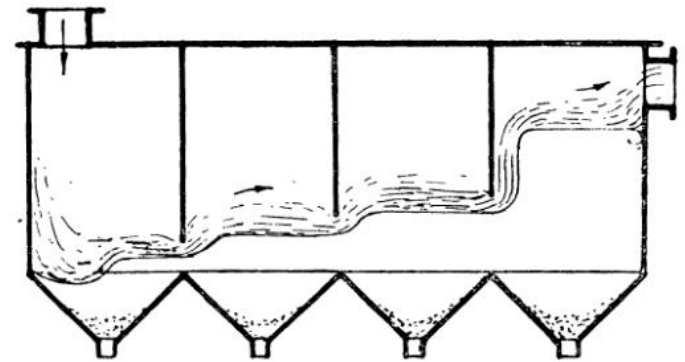
$$v = 0,5 : 0,476 = 1,05 \text{ м/сек,}$$

и время пребывания газа в газопровод, а следовательно время отстаивания пыли увеличится в $1,64 : 1,05 = 1,6$ раз.

Делая газопровод нужной длины и диаметра, мы можем добиться очень тонкой очистки газов.



Фиг. 144.



Фиг. 145.

Здесь дается только метод рассуждения и идея, нужных для практики опытов, ибо пыль, конечно, весьма субъективна для генераторов и доменных печей, работающих на различных материалах.

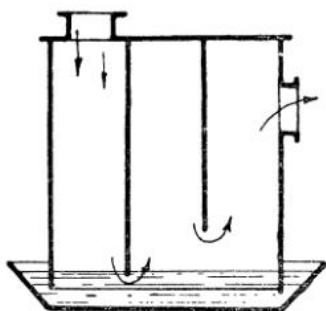
Газоочиститель только-что разобранного типа, но представляющий отдельные устройства, изображен на фиг. 143. В нем пыль, оседающая на дно газопровода, попадает в сосуд с водой и удаляется в щель, сделанную сбоку.

Фиг. 144 представляет правильно спроектированный очиститель.

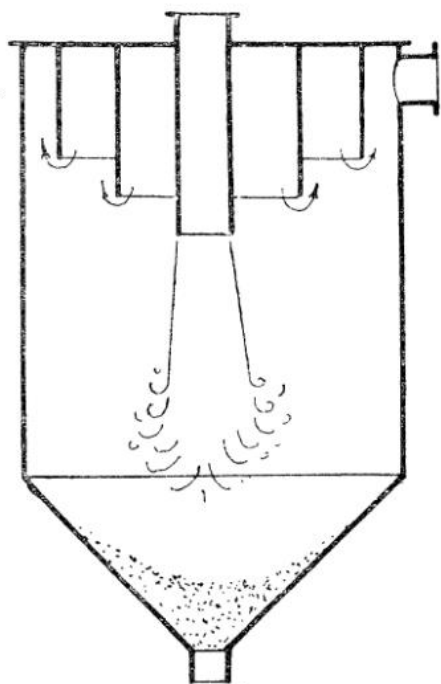
Скорость, с которой вступают газы в очиститель должна быть пропорционирована так, чтобы

фонтан, направленный вниз, не коснулся бы дна газоочистителя; в конце камеры сделана перевальная стенка, благодаря которой струя в газосливе освободится от значительной части пыли, захваченной из первого отделения газоочистителя.

Число таких газосливов полезно увеличивать, как это показано на фиг. 145, 146 и 147. При небольшой высоте газослива очистка газа должна быть весьма совершенной. Устройства эти прежде своего осуществления должны быть предметом изыскания в аэродинамических лабораториях, посвя-



Фиг. 146.



Фиг. 147.

щенных вопросам газоочистителей и разработкой идей устройств, возможных с точки зрения гидравлической теории.

Очень хорошее устройство представляет газоочиститель фиг. 148. Фонтан теплого газа, направленный вниз, не достигает дна пылеуловителя. Глубину погружения этого фонтана можно вычислить на основании формулы И. Есьмана (см. стр. 26).

$$H = \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_n}{t_o - t_n}$$

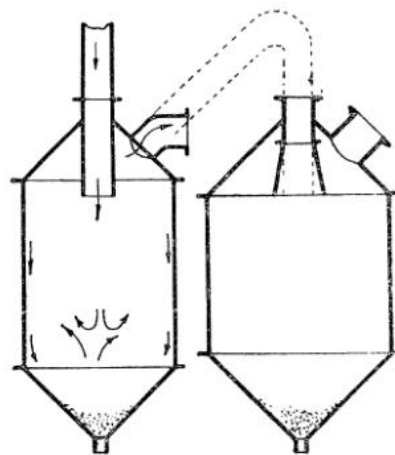
примем $t_o = 200^\circ \text{C}$; $t_n = 100^\circ \text{C}$

$$v = \frac{\text{объем газа при } 200^\circ \text{C}}{\text{сечение патрубка газопр.}} = \approx 4 \text{ м/сек.}$$

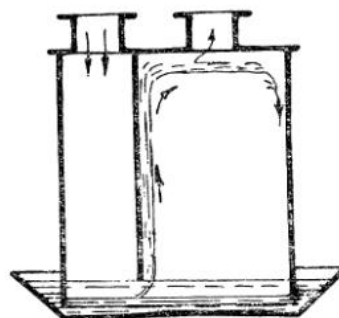
$$\text{тогда } H = \frac{4^2}{2g} \frac{273 + 100}{200 - 100} = 3 \text{ м.}$$

Сделав высоту барабана около 5 м мы, вполне обеспечим себя от удара струи о дно газоочистителя. Если поставить ряд таких барабанов, то можно получить очень хорошую очистку.

Очень часто делают очиститель с водяным затвором (фиг. 149); он очень полезен как водяной затвор для уединения целой ветви газопроводов, но



Фиг. 148.



Фиг. 149.

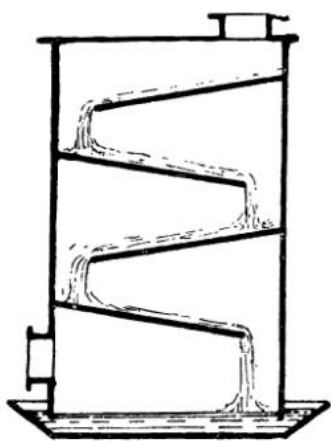
весьма плох, как очиститель, ибо правая его половина почти не работает, т. к. газ поднимается кверху тоненькой струйкой.

На фиг. 150—промыватель газа. Газ проходит под полками с водой, с значительно меняющейся скоростью. Едва ли можно достигнуть смачивания всей поверхности сделанных ступенек. Если бы это удалось, то, конечно, вода могла бы смывать пыль с полок, и очиститель работал бы порядочно. Обыкновенно же он работает очень плохо. В одном таком очистителе я снял все полки и превратил его в тип фиг. 144, и он стал работать без воды гораздо лучше.

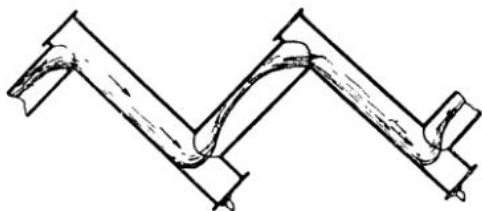
Совершенно не заслуженной популярностью пользуется газопровод из колен под углом в 45° к

горизонту (фиг. 151). Совершенно очевидно, что в восстающем колене мы будем иметь очень тонкую струйку газов весьма большой скорости, при которой осадка пыли невозможна. В нисходящих коленах теплый газ идет полной струей и опять-таки осадка мелкой пыли делается невозможной.

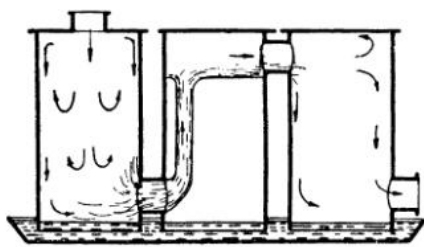
Ни сколько не лучше еще более популярное устройство газоочистителей в виде трех барабанов (фиг. 152) с переменным направлением газа вверх и вниз. В первом барабане осадка тонкой пыли мешает отвод газа с уровня воды; вместе с газом



Фиг. 150.



Фиг. 151.

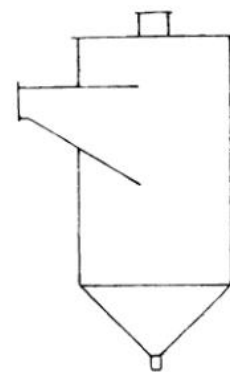


Фиг. 152.

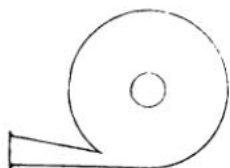
увлекается и тонкая пыль. Во втором барабане получается тонкая струйка поднимающегося кверху теплого газа. В остальном пространстве получается очень слабая циркуляция газа, вследствие лучеиспускания стенок барабана, в которой принимает участие ничтожное количество газа. Остальной газ проходит в третий барабан, осадка в котором так же мала, как и в первом.

Из газоочистителей, работающих на других, кроме описанного, принципах необходимо отметить газоочиститель с центробежной очисткой, и идею Cottrell'я очистки газа в электрическом поле.

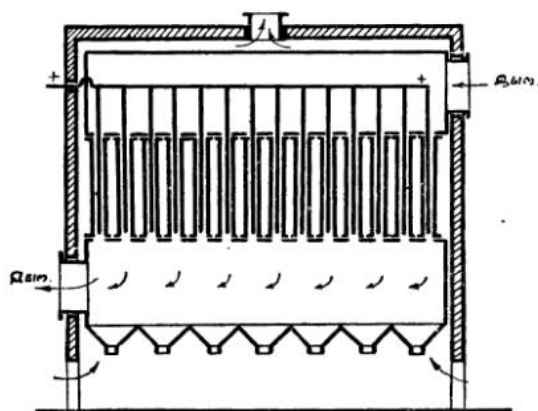
Фиг. 153 представляет тип газоочистителя с центробежной очисткой. Доменный газ подводится по касательной узкой щелью. Газ движется горизонтально вдоль круглых стен барабана, пыль направляется по винтовой линии книзу, а теплый газ кверху. Лучеиспускание стенок дает у стен слой холодных газов, стремящийся книзу и облегчающий пыли ее падение. Газ отводится из центра верхней крышки барабана. Идея такого барабана родилась среди моих учеников в заводе Юза, Екатеринославской губ. Очиститель был построен и осаждал много пыли.



Фиг. 153.



Я не буду входить в детали блестящей идеи Cottrell'я — очищать газ, заряжая пылинки электричеством. То, что им опубликовано¹⁾, относится к первым его неудачным конструкциям, когда он направлял остывающие струи дыма кверху. Конструкция оказалась неудачной, и по имеющимся сведениям исправлена, и газ в трубах направлен им теперь книзу. В общем, его очиститель должен иметь вид фиг. 154. Если окружить его кирпичным фахверковым футляром, то в нем может подогреваться воздух, который удобнее всего отводить кверху.



Фиг. 154.

Газгольдеры.

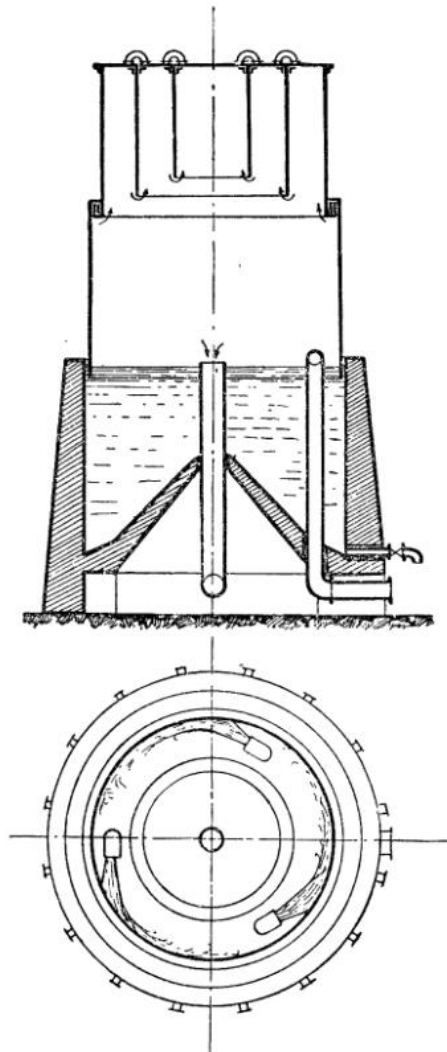
Употребление газов доменных и коксовых печей только тогда вступает в фазу серьезно поставленного дела, когда газы будут собираться в газгольдеры, и из них уже будут направляться в мартеновские и другие печи.

¹⁾ См. Ж. Р. М. О. 1914, II 2-7 и Met. und Erz, XI (II), 1914, 22 Apr. 257—278.

Емкость газгольдеров должна быть рассчитана так, чтобы в случае уханья калов на доменной печи, смены фурм или других аварий, можно было бы закончить плавку.

Следовательно, запаса газа должен быть по крайней мере на 2—3 часа, откуда следует, что газ должен находиться в газгольдере 2—3 часа.

Это время достаточное для самой тонкой очистки газа при помощи простого отстаивания, если только газгольдер был построен правильно.



Фиг. 155.

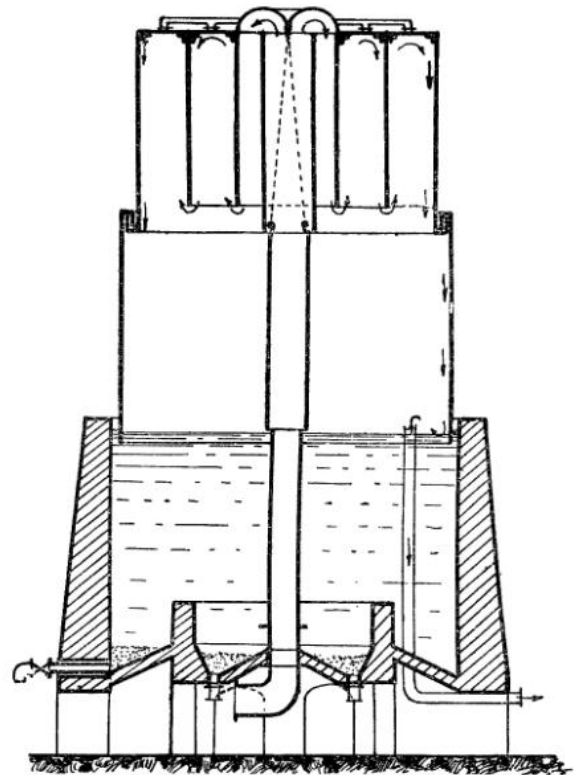
На фиг. 155 представлен газгольдер с центробежной очисткой газа. На фиг. 156 с очисткой газа фонтаном, направленным вниз, и газосливами.

В первом типе горячая струя, следующая круглой стенке газгольдера, борется с нисходящими холодными струйками, падающими вниз, вследствие лучеиспускания стенок газгольдера и попадают последовательно в три мешка горячих газов, переливаясь из одного в другой и последовательно очищаясь от пыли.

Отвод газа происходит из центра газгольдера на уровне его водяной поверхности. Таким образом, отвод газа происходит в самом низу газ-

гольдера, но так как над газоотводной трубой находится чистый газ без пыли, то опасности засорения газа не существует. Диаметр центрального мешка горячих газов сделан мною равным $\frac{1}{3}$ диаметра газгольдера или $\frac{1}{3}$ емкости верхнего барабана; следовательно $\frac{8}{9}$ емкости всегда полезно работают над очищением газа от пыли.

Газгольдер фиг. 156 построен на принципе полного согласия движения пыли с конвекционными потоками, происходящими от лучеиспускания. Горячие газы проводятся, при помощи центральной телескопной трубы в купол газгольдера, и опрокидываются фонтанами вниз. Затем газосливами направляются к периферии газгольдера, при чем во внешней части газгольдера пыль увлекается вниз



Фиг. 156.

конвекционными потоками. Газ отводится из газгольдера при помощи двух-трех труб, расположенных в некотором расстоянии от внешней стенки газгольдера, посредине внешнего мешка горячих газов, как места, наиболее чистого от пыли.

Из двух описанных конструкций газгольдеров лучше, вероятно, будет вторая. Во всяком случае обе эти конструкции должны быть проверены на практике.

Мне кажется, что газгольдеры такого устройства могут вполне заменить очистку газа в приборах Тейснера.

Бассейн, в который спускается колокол газгольдера, будет заполняться пылью. Придавая его дну показанную на фиг. 155 и 156 форму, мы можем спустить из газгольдера весь шлам, оседающий на его дне.

ГЛАВА V.

Основы правильной конструкции сушил.**Теория суши.**

Быстрая и равномерная сушка легко осуществляется, когда подвергающиеся сушке предметы совершенно равномерно омываются потоком сухого теплого воздуха. Это возможно только в том случае, когда потоку теплого легкого воздуха будет дано нисходящее направление, остывший же тяжелый, влажный воздух будет удаляться снизу в дымовую трубу.

Если взять совершенно сухой воздух и той же температуры влажный воздух, то мы увидим, что влажный воздух легче сухого. Поэтому в сушильных приборах воздух, вступающий в сушило и скопляющийся под его потолком, должен быть более высокой температуры, чем воздух, собирающийся у пода сушила и удаляемый в дымовую трубу. Соотношение температур воздуха, вступающего и покидающего сушило, или температур под потолком и у пода сушила нетрудно найти из сравнения весов сухого и влажного воздуха (см. таблицу I и график фиг. 157).

Таблица I.

Температура в °С. <i>t</i>	Вес 1 м ³ сухого воздуха при давлении 1,0333 кг/см ² и температуре <i>t</i> , в кг.	Вес 1 м ³ влажного воздуха, насыщенного водяными парами при общем давлении 1,0333 кг/см ² и температуре <i>t</i> , в кг.	Вес 1 м ³ сырого воздуха при влажности 75% при общем давлении 1,0333 кг/см ² и температуре равной <i>t</i> , в кг.
0	1,2932	1,2902	1,2911
5	1,2699	1,2658	1,2667
10	1,2475	1,2418	1,2431
15	1,2258	1,2181	1,2200
20	1,2049	1,1946	1,1972
25	1,1847	1,1709	1,1743
30	1,1651	1,1469	1,1514
35	1,1462	1,1224	1,1285
40	1,1279	1,0973	1,1050
45	1,1102	1,0710	1,0808
50	1,0930	1,0431	1,0559
55	1,0763	1,0135	1,0294
60	1,0601	0,9825	1,0022
65	1,0445	0,9484	0,9727
70	1,0292	0,9111	0,9410
75	1,0144	0,8710	0,9071
80	1,0001	0,8287	0,8703
85	0,9861	0,7774	0,8298
90	0,9725	0,7241	0,7865
95	0,9593	0,6639	0,7374

Температура в °С. <i>t</i>	Вес 1 м ³ сухого воздуха при давлении 1,0333 кг/см ² и температуре <i>t</i> , в кг.	Вес 1 м ³ влажного воздуха, насыщенного водяными парами при общем давлении 1,0333 кг/см ² и температуре <i>t</i> , в кг.	Вес 1 м ³ сырого воздуха при влажности 75% при общем давлении 1,0333 кг/см ² и температуре равной <i>t</i> , в кг.
100	0,9464		0,6858
105	0,9359		
110	0,9217		
115	0,9099		
120	0,8983		
125	0,8870		
130	0,8760		
135	0,8653		
140	0,8548		
145	0,8446		
150	0,8346		
155	0,8248		
160	0,8153		

Предполагая вес влажного воздуха, покидающего сушило, равным весу сухого воздуха под входом сушила, мы можем составить таблицу II и график фиг. 158 для температур внизу и сверху сушила.

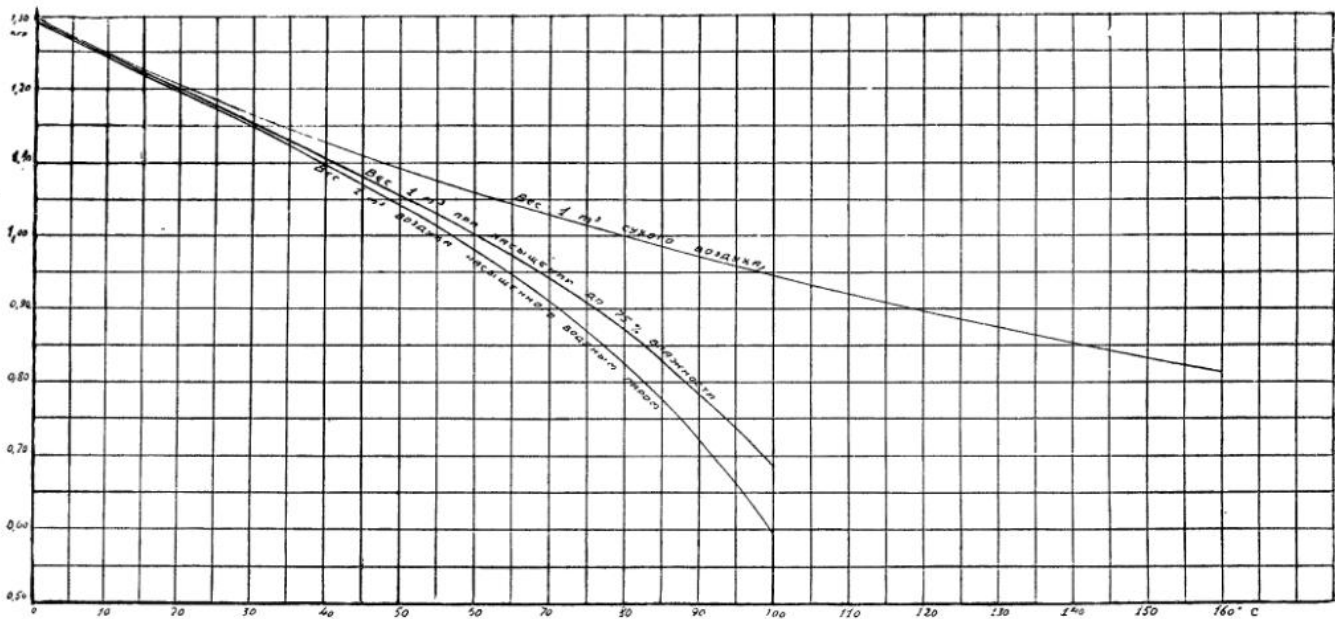
Влажность сырого воздуха взята в 100%. При меньшей влажности воздух той же температуры будет тяжелее, чем при влажности в 100%.

Таблица II.

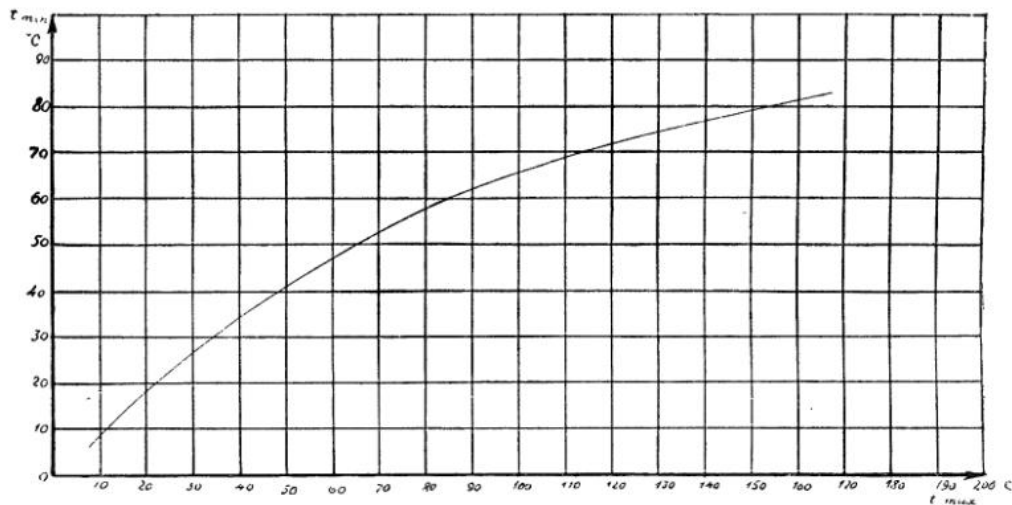
Температура сверху сушила. <i>t_{max}</i> °С	Температура снизу сушила. <i>t_{min}</i> °С	Температура сверху сушила. <i>t_{max}</i> °С	Температура снизу сушила. <i>t_{min}</i> °С
10	8,6	90	61,6
15	13,4	95	63,5
20	17,9	100	65,3
25	22,2	105	67,0
30	26,3	110	68,6
35	30,2	115	70,2
40	33,9	120	71,7
45	37,4	125	73,1
50	40,7	130	74,4
55	43,9	135	75,7
60	46,9	140	76,9
65	49,7	145	78,1
70	52,4	150	79,2
75	54,9	155	80,2
80	57,3	160	81,2
85	59,5		

В руководствах по сушке продуктов сельского хозяйства, дерева и проч. материалов обыкновенно указывается максимальная температура сушки, когда продукт начинает портиться. Если принять эту температуру за температуру вступающего в сушило теплого воздуха или температуру у потолка

сушила, или температуру влажного воздуха, покидающего сушило. Если насыщение воздуха влажностью меньше 100%, то такой полусырой воздух при этой температуре тяжелее воздуха, достигшего полной влажности и, следовательно, тоже опустится на подсушила и не нарушит правильности его работы.



Фиг. 157.



Фиг. 158.

сушила, то по кривой (график фиг. 158) нетрудно найти температуру воздуха внизу, при 100% влажности, одинакового с верхним удельного веса.

Таким образом, мы найдем температуру у пода

Вот некоторые, взятые из руководств температуры сушки и найденные указанным путем температуры воздуха, вступающего t_{max} и покидающего t_{min} сушило.

Т а б л и ц а III.

Предметы сушки.	t_{max} °C	t_{min} °C	Предметы сушки.	t_{max} °C	t_{min} °C
Дрова	160	81,2	Картоф., овощи, фрукты	90	61,6
Мелкий лес	90	61,6	Крахмал	50	40,7
Крупный лес	50	40,7	Яйца	50	40,7
Столярный лес	40	33,9	Мясо	40	33,9
Хлеб на помол	75	54,9	Ткани	60	40,7
„ „ посев	55	43,5	Шелк	130	71,5
Кожа хром	60	46,9	Макароны	50	40,7
„ юфть	35	30,2	Сахар	130	74,5
„ подошв.	25	22,2			

Найдя распределение температур внутри сушила, решим вопрос о наивыгоднейшей температуре воздуха, покидающего сушило.

Назовем соотношение между количеством тепла в паре влажного воздуха ко всему количеству тепла во влажном воздухе — «коэффициентом полезного действия сушики». Это будет величина несколько большая коэффициента полезного действия сушила, ибо не приняты в расчет расход на нагрев сушимого предмета до температуры сушики и лучеиспускание стен сушила.

Нижеследующая таблица IV, вычисленная для случая 75%, влажности дает нам совершенно определенный ответ на поставленный вопрос.

Таблица IV.

Температура внизу сушила t_{min} , °C	Теплосодержание			Сумма (в кал)	Коэффициент полезного действия сушики (в %).
	сухого воздуха в 1 м ³ смеси, при насыщении до 75% и давлении 1,0333 кг/см ² и т-ре t_{min} .	пара содержащегося в 1 м ³ сырого воздуха при насыщении до 75%, давлении и смеси 1,0333 кг/см ² и т-ре t_{min} .			
10	2,868	4,141	7,009	59	
20	5,519	7,690	13,209	58	
30	7,690	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	83	
70	12,926	91,714	104,640	88	
80	12,120	136,826	148,956	92	
90	9,826	198,900	208,722	95	

Полезный коэффициент сушики тем выше, чем выше температура воздуха покидающего сушило, конечно при условии возможного насыщения воздуха влагой.

Такое парадоксальное решение этого вопроса происходит вследствие весьма быстрого увеличения влагоемкости сухого воздуха с повышением температуры.

Само собой понятно, что коэффициент полезного действия сушики тем выше, чем больше степень влажности отработавшего воздуха. Вычислим для примера зависимость коэффициента полезного действия сушики от степени влажности отработавшего воздуха при $t_{min} = 55^\circ\text{C}$. Получим следующую таблицу (V).

Таблица V.

Относительная влажность воздуха покидающего сушило при температуре $t_{min} = 55^\circ\text{C}$ K %.	Теплосодержание			Сумма (в кал).	Коэффициент полезного действия сушики (в %).
	воздуха в смеси, при общем давлении смеси 1,0333 кг/см ² о температуре = 55°C, и влажности воздуха равной K% (в кал).	пара в смеси, при общем давлении смеси 1,0333 кг/см ² , температуре = 55°C и влажности воздуха равной K% (в кал).			
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	56,712	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	

Из этой таблицы следует, что сушить выгоднее при полном 100% насыщении парами воды отработавшего воздуха. Практика однако показывает, что это невозможно. При местном понижении температуры в некоторых уголках сушила ниже точки росы, сушимый продукт в этих местах «распаривается» и теряет свои качества.

Вот почему насыщение отработавшего воздуха выше 75% не желательно и в таблице IV совершенно правильно взята именно эта влажность.

Перейдем теперь к расчету внутренних размеров сушильной камеры и циркуляции потоков теплого воздуха вокруг отопительных устройств и сушимых предметов.

Обозначим температуру входящего сухого воздуха или максимальную температуру сушики t_{max} .

Температуру отработавшего сухого воздуха t_{min} .

Полное теплосодержание пара

$$\begin{aligned} &\text{при } t_{max} \dots \dots \lambda_{max}^1) \\ &t_{min} \dots \dots \lambda_{min} \\ &\lambda_{max} - \lambda_{min} = b. \end{aligned}$$

1) λ предположим зависящим только от температуры и равным: $\lambda = 606,5 + 0,305t$ Это предположение неточно так как λ кроме того зависит и от давления, но введение поправки настолько усложняет нижеследующие выводы, что приходится жертвовать точностью для получения удобной для расчетов формулы.

Количество тепла выделяемое воздухом и паром при первом охлаждении

- от t_{max} до t_{min} Θ_1
- при втором Θ_2
- „ третьем Θ_3 и т. д.

Число подогревов воздуха внутри сушила . . n .

Количество испаренной при каждом подогреве воды— q_1, q_2, q_3, \dots

Теплоемкость воздуха 0,2375.

Далее обозначим $q_1 + q_2 + q_3 + \dots = Q =$ влажности воздуха при 75% насыщения и t_{min}

1-е насыщение. Теплый воздух, охлаждающийся от t_{max} до t_{min} выделит тепла:

$$\Theta_1 = (t_{max} - t_{min}) \cdot 0.2375 = a \text{ кал.}$$

Этим теплом он испарит влажности: $q_1 = \frac{a}{\lambda_{min}}$

2-е насыщение. Вторично подогретый и остуженный воздух выделит тепла:

$$\Theta_2 = a + \frac{a}{\lambda_{min}} (\lambda_{max} - \lambda_{min}) = a + \frac{ab}{\lambda_{min}} = a \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right).$$

Он испарит воды $q_2 = \frac{a}{\lambda_{min}} \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right)$. Всего

$$\text{воды в нем } q_1 + q_2 = \frac{a}{\lambda_{min}} + \frac{a}{\lambda_{min}} \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right) = \frac{a}{\lambda_{min}} \left\{ 1 + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right) \right\}.$$

3-е насыщение. Третий раз подогретый и охлажденный воздух выделит тепла:

$$\Theta_3 = a + \frac{ab}{\lambda_{min}} \left\{ 1 + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right) \right\}. \text{ Он испарит}$$

воды $q_3 = \frac{a}{\lambda_{min}} + \frac{ab}{\lambda_{min}^2} \left\{ 1 + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right) \right\}$. Всего

воды в нем:

$$q_1 + q_2 + q_3 = \frac{a}{\lambda_{min}} + \frac{a}{\lambda_{min}} \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right) + \frac{a}{\lambda_{min}} + \frac{2ab}{\lambda_{min}^2} + \frac{ab^2}{\lambda_{min}^3} = \frac{a}{\lambda_{min}} \left\{ 1 + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right) + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right)^2 \right\}.$$

n -е насыщение. n -раз подогретый и охлажденный воздух будет заключать влажности:

$$\psi = \frac{a}{\lambda_{min}} \left\{ 1 + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right) + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right)^2 + \dots + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right)^{n-1} \right\} = \frac{a}{\lambda_{min}} \left\{ \frac{\left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right)^n - 1}{\left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right) - 1} \right\} = \frac{a}{b} \left\{ \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right)^n - 1 \right\}.$$

n есть число насыщений, нужное для достижения принятой влажности, т.е. число подогревов, которые должен испытать воздух, чтобы насытиться влагой до степени 75% его влажности ранее, чем выйти из сушила.

Ниже мы увидим, что нагревательные аппараты располагаются в сушילה так, что возбуждают в нем непрерывную циркуляцию воздуха. Определенное по этой форме n дает нам указание, сколько раз воздух должен омыть сушимый предмет раньше, чем удалиться из сушила.

Из последнего выражения получим:

$$1 + \frac{Qb}{a} = \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right)^n, \text{ или}$$

$$n = \frac{\lg \left(1 + \frac{Qb}{a} \right)}{\lg \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}} \right)} = \frac{\lg \left(1 + Q \frac{606.5 + 0.305 t_{max} - 606.5 - 0.305 t_{min}}{0.2375 (t_{max} - t_{min})} \right)}{\lg \left(1 + \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{\lambda_{min}} \right)} = \frac{\lg (1 + 1,284 Q)}{\lg \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}}$$

На основании этой формулы вычислена таблица VI, которую необходимо рассматривать как первое приближение ввиду допущенных неточностей.

Таблица VI.

Температура вверху сушила t_{max} °С.	Число подогревов n .
10	12,0
20	11,5
30	11,1
40	10,7
50	10,3
60	9,9
70	9,6
80	9,4
90	9,2
100	9,0
110	8,8
120	8,6
130	8,4
140	8,2
150	8,1
160	8,0

Таким образом, мы получаем, что в сушиле воздух циркулирует от 8 до 12 раз, постепенно насыщаясь влажностью. Перед последним подогревом в воздухе содержится от $\frac{7}{8}$ до $\frac{11}{12}$ установленной нами влажности в 75%, т. е. 68,5 и 65,5%. После последнего подогрева относительная влажность воздуха естественно будет меньше, причем при t_{max} больше 100°C, воздух будет в состоянии вынести любое количество пара. Припоминая, что подогретый воздух находится под сводом сушила, а холодный, при температуре t_{min} , на полу сушила, мы приходим к выводу, что сушка внизу и вверху сушила будут существенно различны; вверху сушила осуществляется сушка более резкая, внизу более мягкая.

Некоторые материалы, например бездымный порох, при резкой сушке дают корочку, которая не гигроскопична и потому тормозит успешность сушки. Центральные волокна пороха просыхают в этом случае очень медленно. В сушилах однократного насыщения поэтому к теплomu воздуху прибавляют пар: обыкновенно-же один и тот же воздух прогоняют через нагревательный прибор много раз, обращая сушило в сушило многократного насыщения с принудительным движением воздуха при помощи вентилятора.

Эту разнохарактерность сушки вверху и внизу сушила многократного насыщения с естественной циркуляцией должно учитывать при ответственной сушке, например сушке семенного хлеба. Понижение всхожести семян есть следствие спутанности наших понятий о работе сушил и поэтому малой изученности условий наиболее благоприятной сушки, сохраняющей всхожесть семян. То же касается сушки дерева, которая вообще плохо удается.

При сушке разнохарактерных керамических изделий нагрузка сушила должна учитывать разный характер сушки внизу и вверху.

Другим недостатком сушки является запаривание материала, т. е. конденсация паров воды на вновь введенном в сушила холодном сыром материале. В таб. VII в последней графе помечена точка росы циркулирующего в сушиле воздуха. Приведении в атмосферу теплого воздуха холодного предмета на его поверхности, конечно, будет садиться роса.

Если, например, в коридорное сушило для столярного леса ввести с мороза вагон, то очевидно весь лес покроется росой. Этот недостаток можно ослабить, если приемную часть сушила, куда вводится вагон с холодным сырым материалом, снабжать более значительным числом нагревательных приборов и сюда же вводить наружный воздух. Дымовой канал сушила правильнее располагать ближе к тому концу коридора, через который вагоны с сухим лесом выводятся наружу. Таким

Таблица VII.

Температура вверху сушила t_{max}	Температура внизу сушила t_{min}	Число подогревов воздуха внутри сушила и.	Приблизительная влажность воздуха перед последним подогревом при температуре $= t_{min}$	Точка росы °C
20	17,9	11,5	68,5	13
30	26,3	11,1	68,2	21
40	33,9	10,7	68,0	28
50	40,7	10,3	67,7	34
60	46,9	9,9	67,5	40
70	52,4	9,6	67,3	45
80	57,3	9,4	67,1	50
90	61,6	9,2	66,9	54
100	65,3	9,0	66,7	58
110	68,6	8,8	66,5	62
120	71,7	8,6	66,3	65
130	74,4	8,4	66,1	68
140	76,9	8,2	65,9	71
150	79,2	8,1	65,7	73
160	81,2	8,0	65,5	75

образом цифры и логика убеждают нас, что в сушилах многократного насыщения принцип обратного течения не должен иметь места.

Для того, чтобы ослабить явление запаривания, необходимо так располагать материал для сушки, чтобы он нагревался возможно скорее.

Это достигается таким его расположением, чтобы вертикальная циркуляция воздуха могла бы осуществляться беспрепятственно. Дрова надо ставить вертикально; так же вешать ткани; решета надо располагать стопами с широкими промежутками между этими последними.

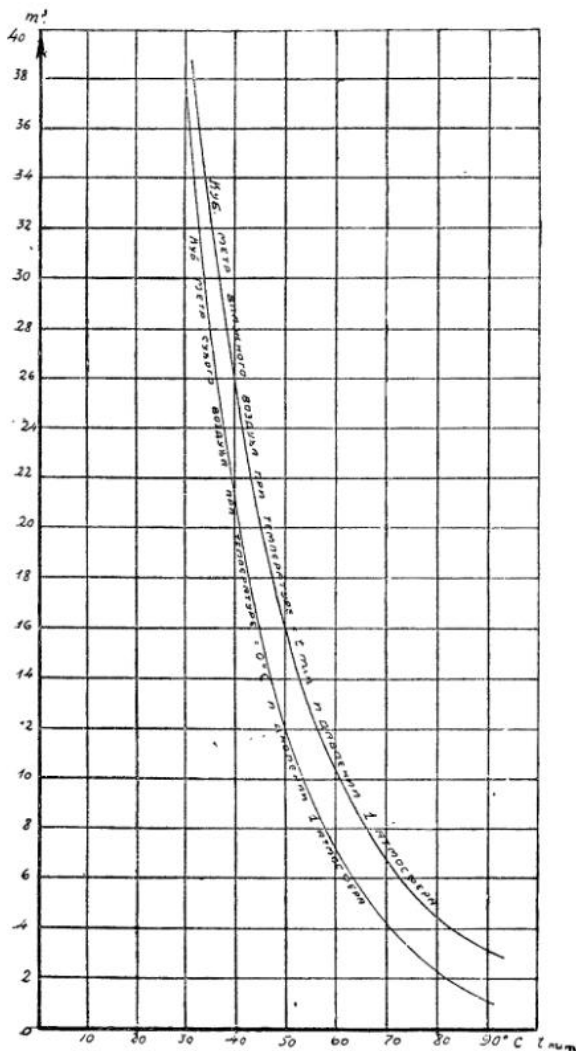
Плотное расположение материалов, подвергающихся сушке, трудная проницаемость их для вертикальной циркуляции, неправильное расположение отопительных устройств способствует запариванию и порче материалов, подвергающихся сушке.

Выяснив работу воздуха в сушилах, подсчитаем какое количество воздуха необходимо для полного удаления влаги из сушила.

В результате подсчетов мы получим табл. VIII, которая служит основанием для графика фиг. 159. На основании этих кривых, зная из таблицы II, t_{min} легко найти количество воздуха всту-

Таблица VIII.

Температура у пода сушила. t_{min} ($^{\circ}\text{C}$.)	Колич. сухого воздуха которое необходимо доставить в сушило для удаления 1 кг. влаги, если температура внизу сушила равна t_{min} и относительная влажность удаляемого воздуха равна 75%.		Колич. влажного воздуха, которое необходимо удалить из сушила при удалении 1 кг. влаги, если температура внизу сушила равна t_{min} и относительная влажность удаляемого воздуха равна 75%.	
	Кг.	Кубических метров при 0°C и давлении в 1 атм.	Кг.	Кубических метров при температуре t_{min} и давлении в 1 атм.
10	177		178	143
20	91,8	71,0	92,8	77,5
30	49,7	38,4	50,7	44,1
40	27,9	21,6	28,9	26,1
50	16,0	12,4	17,0	16,1
60	9,23	7,18	10,28	10,26
70	5,34	4,13	6,34	6,73
80	2,95	2,23	3,95	5,54
90	1,47	1,14	2,17	3,15



Фиг

пающего в сушило и удаляемого из сушила т.-е. основы для расчета нагнетательного или всасывающего вентилятора или другого прибора, например, дымовой трубы. Для расчета отопительных устройств можно воспользоваться столбцом 4 таблицы IV (стр. 66). Прибавив расход тепла на лучеиспускание, мы получим количество тепла, которое необходимо доставить в сушило.

Таким образом, мы пришли к следующим выводам:

1. Для того, чтобы увлажнить воздух в сушильной камере до 75% он должен быть подогрет от 8 до 12 раз.

2. После каждого подогрева теплый воздух подымается к потолку сушильной камеры и, насыщаясь парами воды, стынет и опускается к поду сушила.

3. Внутри сушила происходит циркуляция: сверху вниз подогретого и стынувшего, снизу вверх подогреваемого воздуха.

4. Для того, чтобы возбудить такую вертикально направленную циркуляцию воздуха внутри сушила, отопительные приборы надо расположить вертикально, лучше всего придав им вид вертикальных жаровых, или труб водяного или парового отопления.

5. Вертикальная поверхность жаровых труб возбуждает вдоль нее вертикальные конвекционные потоки горячего воздуха, наполняющего сушило, и дает импульс циркуляции.

6. Сушимые предметы тоже необходимо располагать вертикально или вертикальными стопами. Так надо располагать дрова в сушиле для дров. Вертикальными стопами надо располагать решета для сушки овощей, полки для сушки кирпича и т. д.

Таким образом выясняются главные основания правильной конструкции сушил.

а) вертикальное расположение отопительных устройств и такая их конструкция, которая способствовала бы возбуждению вертикальных конвекционных потоков нагреваемого воздуха.

в) такое же расположение сушимых предметов, которое способствовало бы созданию в полости сушила между сушимыми предметами вертикальных нисходящих потоков остывших газов.

7. Количество циркулирующего воздуха в 8—12 раз должно превосходить секундный расход теплого влажного воздуха, определяемого по таблице VIII.

8. Скорости циркуляции не должны быть велики, ибо импульс всей циркуляции дается разностью весов воздуха при t_{min} и t_{max} , т.-е. величиной весьма незначительной. Поэтому вертикальные циркуляционные каналы должны быть широки и рассчитаны в зависимости от объема циркулирующих газов.

9. Расход тепла на нагрев сушимых материалов и лучеиспускание должны быть по возможности меньше. Покрыть этот расход можно двумя путями: а) располагая отопительные устройства у стен сушила, и делая достаточный промежуток между потолком и сушимыми предметами, можно

несколько поднять температуру t_{max} , в расчете на то, что воздух, омывая наружные стены, успеет остыть раньше, чем придет в соприкосновение с сушимыми предметами, б) другой путь — это настолько увеличить число циркуляций, чтобы покрыть расход на лучеиспускание.

Таблица IX.

Максимальная допустимая температура сушиль. t_{max} °C	Температура отходящего сырого воздуха. t_{min} °C	Вес 1 м ³ воздуха при насыщении его водяными парами до 75%, температуре t_{min} и давлении 1,0333 кг/см. ² в кг.	Вес 1 м ³ сухого воздуха при температуре t_{max} и давлении 1,0333 кг/см. ² в кг.	Число кг сухого воздуха, необходимое для удаления 1 кг влаги при насыщении воздуха до 75%.в кг.	Число кг сырого воздуха, удаленного из сушила при удалении 1 кг влаги, насыщающей воздух до 75%.в кг.	Тепло, необходимое для удаления 1 кг влажности из сушила при насыщении воздуха до 75%.кал.	Число подогревов воздуха внутри сушила.
20	17,9	1,2068	1,2049	110	111	1050	11,5
25	22,2	1,1871	1,1847	83	84	1010	11,3
30	26,3	1,1683	1,1651	66	67	975	11,1
35	30,2	1,1734	1,1462	49	50	940	10,9
40	33,9	1,1335	1,1279	41	42	910	10,7
45	37,4	1,1172	1,1102	34	35	880	10,5
50	40,7	1,1016	1,0930	26,8	27,8	855	10,3
55	43,9	1,0861	1,0763	22,4	23,4	835	10,1
60	46,9	1,0713	1,0601	19,0	20,0	815	9,9
65	49,7	1,0574	1,0445	16,4	17,4	800	9,7
70	52,4	1,0363	1,0292	14,1	15,1	785	9,6
75	54,9	1,0297	1,0144	12,3	13,3	775	9,5
80	57,3	1,0169	1,0031	10,8	11,8	765	9,4
85	59,5	1,0049	0,9861	9,6	10,6	755	9,3
90	61,6	0,9928	0,9725	8,5	9,5	745	9,2
95	63,5	0,9816	0,9593	7,7	8,7	735	9,1
100	65,3	0,9708	0,9464	6,9	7,9	725	9,0
105	67,0	0,9600	0,9339	6,3	7,3	717	8,9
110	68,6	0,9499	0,9217	5,8	6,8	710	8,8
115	70,2	0,9396	0,9099	5,3	6,3	702	8,7
120	71,7	0,9295	0,8883	4,9	5,9	695	8,6
125	73,1	0,9200	0,8870	4,5	5,5	690	8,5
130	74,4	0,9112	0,8760	4,2	5,2	685	8,4
135	75,7	0,9019	0,8653	3,9	4,9	682	8,3
140	76,9	0,8931	0,8548	3,6	4,6	680	8,2
145	78,1	0,8843	0,8446	3,4	4,4	677	8,2
150	79,2	0,8762	0,8346	3,1	4,1	675	8,1
151	80,2	0,8687	0,8248	2,9	3,9	672	8,0
152	81,2	0,8606	0,8153	2,8	3,8	670	8,0

10. В случае сушки дров и леса весьма часто топочные газы вводят в сушильную камеру и ими непосредственно омывают сырые дрова. Так как сушила для дров отапливаются дровами, то в продуктах горения находится значительное количество паров воды. Эти пары воды связывают определенное количество газов влажностью на 75%, это количество печных газов должно быть выключено из общего количества сушащего воздуха и газов, согласно с таблицей VIII, и введено в расчет при расчете количества циркулирующих газов.

Согласно с вышесказанным, при проектировании сушил будем исходить из следующих данных.

- а) Производительность сушила в 1 сек.
 - б) Количество воды, испаряемое в 1 сек.
 - в) Наивысшая температура сушки или температура подогретого воздуха t_{max} .
 - г) Температура отработавшего воздуха t_{min} .
 - д) Количество кг сухого воздуха, вступающего в сушило в 1 сек.
 - е) Количество кг влажного воздуха, удаляемого в 1 сек из сушила.
 - ж) Количество подогревов необходимое для насыщения воздуха до 75% (объем сушила).
 - з) Количество тепла, необходимое для удаления 1 кг влаги.
- Собирая эти данные вместе мы можем составить таблицу IX.

Конструкция сушил правильная и сушила уроды.

Самой распространенной ошибкой в конструкции сушил является отвод отработавших влажных газов сверху. При такой конструкции сушила, струйки сухого теплого воздуха скорее удаляются в трубу, чем остывшие, насыщенные влажностью струйки, и сушка идет очень неравномерно. В полости сушила устанавливаются пути прямой тяги вверх и образуются глухие углы застойных газов, где материал не сушится, а распаривается.

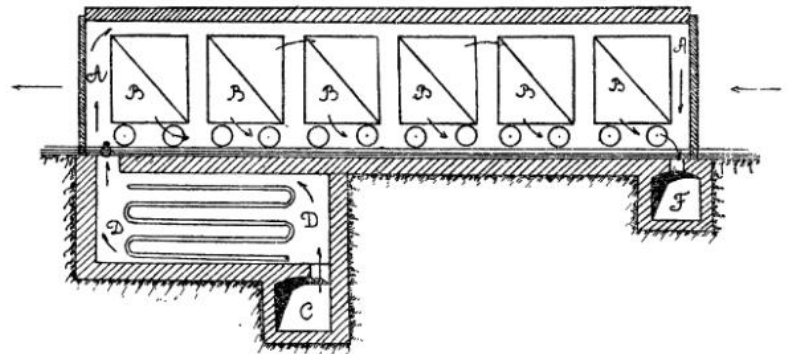
Правильная равномерная сушка возможна только при обмывании сушащихся предметов нисходящим потоком теплых сушащих газов, следовательно, при обращенной тяге.

На основании вышеизложенного, я оставляю без рассмотрения большинство принятых на практике сушил, как построенных на ложном принципе. Первое правило, которому должно удовлетворять правильно построенное сушило, состоит в том, что отработавшие газы отводятся снизу.

а) Сушило однократного насыщения. Прекрасная по оборудованию крахмало-сушилка Лемана (фиг. 160) сушит весьма неудовлетворительно, единственно потому, что насыщение в ней происходит только один раз. Устройство ее та-

ково: в коридоре *AA* движутся вагонетки *BB* с решетками с сырым крахмалом. Вентилятор нагнетает холодный воздух через боров *C* в камеру, где расположены трубы парового отопления. Через отверстие *E* теплый воздух вступает в коридор *AA* и поднимается под свод его. Насыщенный парами воды остывший воздух удаляется с пода через боров.

Расчет этого сушила, не принимая в расчет потери на лучеиспускание, может быть сделан так: сухой воздух, нагретый до 50° С несет в себе количество тепла равное 11,9 кал/кг. Воздух с 75% влажности содержит при 20° С— 11,03 кал/кг тепла. Следовательно температура отработавшего воздуха, не принимая в расчет лучеиспускание и нагрев крахмала и вагонеток, будет несколько выше 20° С, а, приняв их в расчет, несколько ниже 20° С. Будем считать ее в 20° С. Тогда на кг сухого воздуха из сушила будет вынесено 0,0109 кг воды. Полезный коэффициент сушки определится, как



Фиг. 160.

частное от деления количества тепла в паре на все количество тепла во влажном воздухе при 20° С

$$6,6 : 11,03 = 0,60 \text{ или } 60\%.$$

Количество холодного воздуха, которое должно быть нагнетано в сушило для удаления 1 кг воды из крахмала, будет равно 91,8 кг (см. таб. IX).

Если мы сделаем сушило многократного насыщения, то при температуре вступающего в сушило воздуха в 50° С температура отработавшего воздуха будет 40,7° С, примем в 40° С, число насыщений будет 10,3 (таб. IX). Коэффициент полезного действия сушки 70% (таб. IV). Количество сухого воздуха на 1 кг влажности крахмала 27,9 кг (таб. VIII).

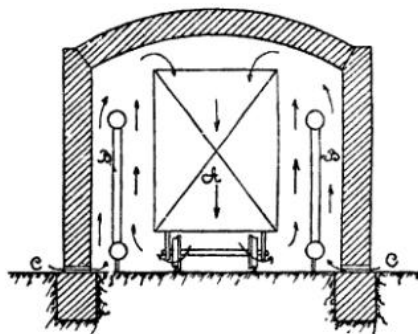
Из этого примера видна выгода сушил многократного насыщения. Коэффициент полезного действия, как мы видели выше, поднялся, а следовательно, расход на нагрев воздуха сократился в $70 : 60 = 1,2$ раза, в дутье в $91,8 : 27,9 = 3,3$ газа.

Очевидно, что производительность сушила данных размеров может быть увеличена введением многократного насыщения в 3 раза.

Какова же должна быть конструкция коридорного сушила многократного насыщения. Совершенно очевидно, что эта конструкция должна обеспечить возможность сушащим газам десятикратного насыщения, т.е. должна быть приспособлена для непрерывной циркуляции десятикратного объема печных газов.

Мы видели, что 1 кг паров воды при 75% влажности и 40° С, может быть вынесен 27,9 кг сухого воздуха, или согласно с таблицей VIII—26,1 м³ влажных, отработавших сушащих газов.

Сила движущая циркулирующий объем есть функция разности весов м³ сушащих газов при t_{max} и t_{min} и не может быть значительна, и скорость циркуляции не может быть велика. Отсюда ясно, что циркуляция печных газов в сушиле должна совершаться в направлении обеспечивающем для струи циркулирующих газов максимальную площадь сечения.



Фиг. 161.

Для коридорного сушила это будет циркуляция в плоскости нормальной к длине сушила, как показано на фиг. 161 где плоскостью циркуляции является плоскость чертежа. Максимальная площадь сечения будет горизонтальная. Нагревающие сушащие газы трубы парового отопления *ВВ* должны, очевидно, быть поставлены по сторонам поезда вагонеток *А* с сырым крахмалом. Собирающиеся на полу остывшие влажные печные газы (воздух) нагреваются и увлекаются этими трубами вверх. Здесь они собираются под сводом, затем опускаются мимо решет с сырым крахмалом, насыщаются парами воды и опять собираются на под коридора, опять нагреваются трубами *ВВ* и таким образом циркулируют сверху вниз и снизу вверх.

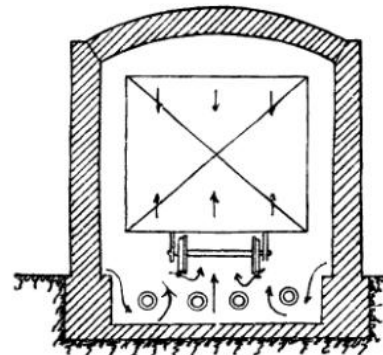
Сушило, способное выделить из сушимого материала 0,1 кг воды в секунду, должно быть рассчитано на циркуляцию $\frac{26,1 \times 10,3}{10} = 26,8$ м³ воздуха в секунду. Мы видели, что поднимающийся по-

ток сушащих газов имеет температуру 50°, а опускающийся 40°. Вес второго по табл. I равен 1,105 кг/м³. Тот же воздух, нагретый до 50° будет весить:

$$\frac{1,105}{1 + \frac{40}{273}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{50}{273}} = 1,071 \text{ кг/м}^3.$$

Гидростатическое давление, вызывающее циркуляцию при высоте сушила в 2 м будет $\delta = 2 (1,105 - 1,071) = 0,068$ кг/м² или мм воды, напор теплого воздуха, равен:

для воздуха в 40°С — $0,034 : 1,105 = 0,031$ м;
 для воздуха в 50°С — $0,034 : 1,071 = 0,032$ м;
 в сумме 0,063 м. За счет этого напора должны быть рождены скорости нисходящего и восходящего циркуляционных потоков воздуха при 40° С вниз и при 50° С вверх. При омывании подвергающихся сушке предметов эти скорости будут утеряны несколько раз. Допустим, четыре раза. Тогда на рождение каждой скорости придется около 0,015 м, т.е. скорость циркуля-



Фиг. 162.

ции будет около 0,5 м/сек. Откуда следует, что коридорная печь должна быть настолько широка, чтобы площадь сечения промежутков между вагонами и стенами удовлетворяла условию движения по ним циркулирующих газов со скоростью меньшей 0,5 метра в 1 секунду.

Тому же условию должно удовлетворять и расположение решет на вагончиках *АА*. Решета надо располагать стопами с большими промежутками между ними.

Устраивая так коридорное сушило, мы получим внутри его правильную циркуляцию, указанную стрелками.

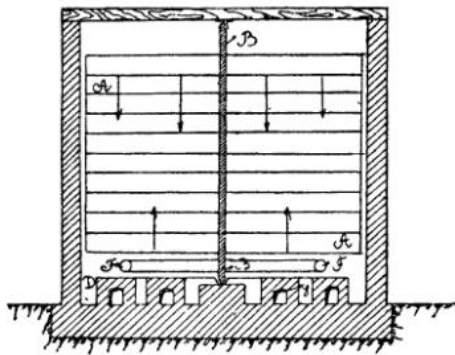
б) Из описания правильной конструкции коридорного сушила совершенно очевидна ошибка допускаемая Клячиным в его сушиле при углевыжигательной печи его имени (фиг. 162). Он располагает нагревательные приборы в яме под рельсами. Очевидно, что струи нагретых сушильных газов будут подниматься навстречу остывших между дровами, отработавших струек и правильной

циркуляции в сушиле установиться не может, а следовательно, невозможна правильная сушка дров и равномерное углежжение.

В интересах правильной сушки, дрова в сушиле надо располагать вертикально. Дно вагонов надо делать не сплошным, а решетчатым. От этих ошибок не избавлены углевыжигательные печи Аминова и Гренделя.

в) Карусель для сушки картофеля Полевицкого (фиг. 163).

Карусель представляет колесо *AA* с вертикальной осью *BB*, на которое устанавливаются совершенно плотно 11 рядов полок с сырым резанным картофелем. Внизу расположены кирпичные борозы *DD*



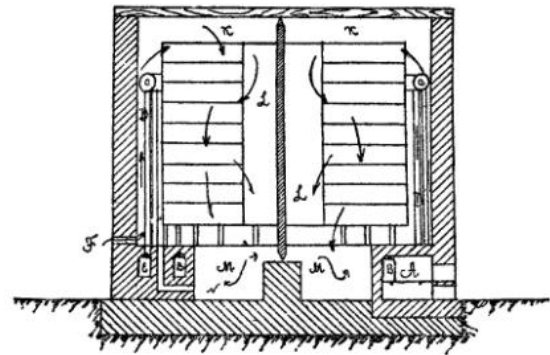
Фиг. 163.

поступает и отработавший влажный воздух. Направление циркуляции показано стрелками.

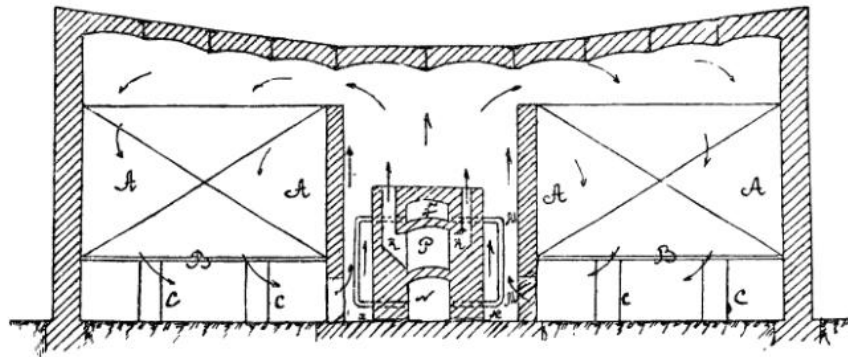
Наружный воздух вступает через отверстия *F*. Обогревается около труб *D* и поднимается к потолку сушила *KK*. Затем омывает решетка с картофелем и проходит между ними в колодезь внутри карусели *LL* и в нижнюю часть сушила *MM*. Чтобы он там не застаивался, служат каналы *N* которыми он вновь подводится к трубам *DD*.

Расчет этого сушила показывает ошибочность тесноты существующих сушил.

Сушило большой производительности должно быть сделано по возможности более просторно, только тогда в нем может установиться правиль-



Фиг. 164.



Фиг. 165.

и кольцеобразная железная труба *LL*, назначение коих подогреть вступающий снизу в сушило воздух. Сырой воздух отводится с низу.

Недостаток карусели тот же, что и печи Клячина. Поднимающиеся теплые струи идут навстречу опускающимся вниз, чем нарушается правильная циркуляция. Неравномерность сушки исправляется непрерывным вращением карусели. Сушка идет медленно. Сушило все заполняют сырым картофелем, высушивают и вновь заполняют сырым картофелем, ибо непрерывная сушка не удастся.

Проект этот должен быть изменен в следующем направлении (фиг. 164). (См. также часть IV гл. VII).

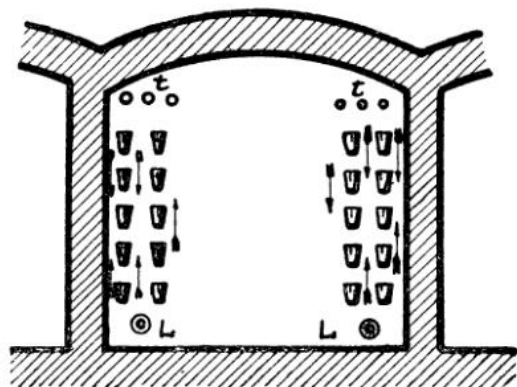
Топочные газы из топки *A*, борозы *B* и кольца железных труб *CC* опускаются по вертикальным железным трубам *DD* в дымовой борозы *E*, куда

направляется циркуляция, достаточно мощная, чтобы обеспечить производительность сушила.

г) Проект сушила для столярного леса. Неравномерность омывания досок теплыми струями воздуха вызывает появление в досках трещин, портящих лес. Их можно будет избежать при правильном омывании досок нисходящими струями циркулирующего в сушиле воздуха.

На фиг. 165 представлено: две стопы досок *AA*, сложенных крест на крест с промежутками в ширину доски. Таким образом объем промежутков равен объему досок. Доски укладываются так аккуратно, чтобы сквозь всю стопу проходили бы вертикальные каналы в ширину доски, что обеспечивает беспрепятственное опускание струй остывшего влажного воздуха. Стопы досок сложены на про-

гонах *ВВ*, опирающихся на выступы стен и кирпичные столбы *СС*. Таким образом под стопой досок получается проход в рост человека и остывший влажный воздух может свободно циркулировать под стопой по направлению к воздухонагревателю с чугунными трубами поставленному в среднем отделении сушила. Воздухонагреватель состоит из топки и борава *Р*, из которого топочные газы



Фиг. 166.

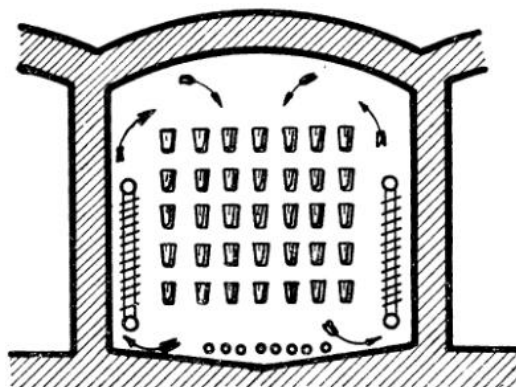
распределяются по трубам *ММ*, опускаясь совершенно равномерно в дымовой боров *Н*, а из него, в дымовую трубу.

Холодный воздух вступает в боров *Р* и, согретый в каналах *RR*, выходит в сушило, поднимается кверху, омывая стоны с досками, спускается через вертикальные колодцы в стопах вниз, под стопы, омывает трубы *ММ*, согревается и поднимается опять вверх, осуществляя, таким образом, циркуляцию и насыщаясь парами воды.

Самый холодный влажный воздух стелется по самому поду сушила. Тут он собирается с пода отверстиями *хх* в дымовой боров *Н* и вместе с дымом выносится дымовой трубой.

д) Сушило Ижевского завода для сушки тиглей для плавки стали. (Фиг. 166).

Сушило это работает без вентиляции. Влажность воздуха, заполняющего сушило, осаждается



Фиг. 167.

трубами с холодной водой, а воздух подогревается трубами парового отопления *LL*. Циркуляция воздуха не равномерна. Очевидно, горячие струи направляются кверху навстречу влажным струям остывшего воздуха. Трубы *tt*, расположенные неверху, напрасно студят теплый воздух, собирающийся наверху. Правильная конструкция показана на фиг. 167—она понятна сама собой.

З а к л ю ч е н и е.

Основные положения гидравлической теории.

1. Движение пламени в печах подчиняется законам движения легкой жидкости в тяжелой (пламени в наружном воздухе).

2. В незамкнутой полости, заполненной теплым легким газом, давление у нижней поверхности нижнего зеркала равно давлению атмосферы. В остальной полости давление выше атмосферного. Газ испытывает обращенное гидростатическое давление, измеряемое высотой столба газа, умноженной на разность веса кубической единицы наружного воздуха и теплого легкого газа.

Имеем: вес 1 м^3 наружного воздуха равен $\frac{1,293}{1+at}$ — где t температура наружного воздуха; H м — расстояние от нижнего зеркала до пункта где измеряется гидростатическое давление;

$\frac{\lambda}{+at_1}$ — вес 1 м^3 теплого, легкого газа при температуре t_1 .

Гидростатическое давление

$$\delta = H \left(\frac{1,293}{1+at} - \frac{\lambda}{1+at_1} \right) \text{ кг/м}^2$$

или мм водяного столба.

3. Всякое движение всякой жидкости есть результат расхода напора.

Скорость движения жидкости определяется по формуле $v = \sqrt{2gh}$, поэтому движение струи теплого, легкого газа или пламени есть результат расхода напора или высоты столба этого газа, и скорость движения определяется той же формулой.

Например: при гидростатическом давлении газа равном δ , напор будет равен:

$$\delta : \frac{\lambda}{1+at} = h,$$

а скорость истечения будет:

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2g \frac{\delta(1+at)}{\lambda}}$$

4. Пламенный поток есть обращенная река.

5. Глубина газослива определяется по формуле

И. Г. Есьмана.

$$h_1 = A \sqrt{\frac{Q_t^2}{B^2 t}}$$

где:

Q_t — расход газа при температуре t в секунду

B — ширина газослива;

t — температура газа;

A — коэффициент определяется из нижеприведенной таблицы, где

h_1 — высота газослива;

E — длина газослива (в данном случае свода печи);

6. Для скорости газовой реки имеем формулу

$$v = \sqrt{\frac{ht}{A^3}} \text{ м/сек.}$$

Скорость газослива так велика (см. стр. 22), что чисто газосливные печи применяются редко, Обычно печи работают с подпруженным газосливом.

7. Газовые фонтаны рассчитываются по формуле

$$H = 0,7 \cdot \frac{v^2 \text{ Sin}^2 \alpha}{2g} \cdot \frac{273 + t_n}{t_0 - t_n}$$

v — скорость струи;

α — уклон струи к горизонту;

g — ускорение силы тяжести,

t_n — температура неподвижной среды;

t_0 — температура движущейся струи фонтана.

При $\alpha = 90^\circ$; $\text{Sin} \alpha = 1$; получим:

$$H = 0,7 \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_n}{t_0 - t_n}.$$

h_1	0,30					0,40					0,50				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
A	3,20	3,41	3,52	3,62	3,67	3,07	3,34	3,51	3,61	3,69	2,95	3,27	3,48	3,59	3,69
h_1	0,60					0,75					1,00				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
A	2,75	3,20	3,45	3,59	3,69	2,71	3,06	3,36	3,56	3,69	2,43	2,95	3,28	3,52	3,70

8. Правила деления потоков:

Стынувший горячий поток делится равномерно на нисходящие струи.

Нагревающийся холодный поток делится на восходящие струи.

Печи, в которых пламя стынет, должны работать с обращенной тягой. Только так устроенные печи способны равномерно нагревать погруженные в них предметы. Поэтому в воздухонагревателях нагревающие их дымовые газы должны быть направлены сверху вниз, а нагревающийся воздух снизу вверх.

9. Отработавшие печные газы должны направляться кратчайшим путем в дымовую трубу. Под должен быть правильно канализован. Должно избегать мешка холодных газов на поду.

10. Мешок горячих газов рекомендуется делать только в тех случаях, когда требуется устройство сожигательной камеры.

11. Подсводовое пространство есть идеальная сожигательная камера; в интересах правильности протекания реакции горения, правильности и равномерности нагрева предметов, расположенных на поду, рекомендуется делать печи с высоким сводом.

12. Чтобы нагревание слитков в методических печах шло быстро, надо располагать слитки на трубах и под ними устраивать дощный поток холодных печных газов.

В печах, где нет шлака, полезно снимать остывшие газы с пода многими вертикальными отверстиями.

13. Садочные окна, прикрытые заслонками, дают ореол печных газов у верхнего края. Дабы уменьшить вред заслонок, давление в печи надо держать атмосферное.

Таким образом механизм работы печи таков: топка накачивает топочные газы в рабочее пространство, дымовая труба удаляет печные газы из рабочего пространства.

Высота дымовой трубы должна быть достаточна, чтобы «протащить» дым через регенераторы, рекуператоры и борова.

14. Все окна печи должны быть расположены на одной высоте; иначе одно окно будет дымовой трубой нижележащего окна.

15. Окна надо делать по возможности ниже.

16. Некоторые печи и приборы, вошедшие в общее употребление, не могут иметь правильной конструкции. Например: уравниватели температуры дутья, кольцевые печи для обжига извести и кирпича (камерные печи для того-же назначения должны иметь перекрещивающиеся каналы).

17. Свод печей должен быть устроен сообразно своему назначению: в печах, в которых желательно сосредоточить высокую температуру в головной части печи нужно иметь понурый свод; в печах, где желательно иметь во всей печи равномерную температуру, свод нужно делать восстающий.

18. Если желательно иметь в передней части высокую температуру, в задней же только подогревать материал, то рабочее пространство полезно разделить занавеской или перевальной стенкой на две части. Высота пролета под занавеской или газосливом рассчитывается по формуле И. Г. Есьмана.

19. Дымовые борова рассчитываются как газосливы, площадка коих равна бесконечности. Так же рассчитываются газопроводы.

20. Для осадки пыли, газ из газопровода надо отводить сверху и увеличивать сечение газопровода, тогда на дне его искусственно получается мешок холодных газов, который при пуске газопровода представляет большие опасности от взрывов. Для предупреждения взрыва в боровке должны быть устроены специальные устройства.

21. Если из газопровода газ распределяется по различным устройствам на различных высотах, то, при остановке дутья в доменную печь, или остановке газогенератора, возможно засасывание воздуха в нижнюю горелку и получение взрывчатой смеси в газопроводе. Чем ближе к домне и выше над уровнем пола будет сделано ответвление, тем безопаснее устройство.

22. Выдавливание холодного воздуха теплым газом сверху вниз и теплого газа холодным воздухом снизу вверх может быть допущено как безопасное. Недопустимо выдавливание в обратном направлении.

23. Взрывчатая смесь в газопроводе совершенно безопасна при сжигании ее под большим давлением, порождающим скорость струи в горелке, большую скорости горения взрывчатой смеси.

24. Слитие отдельных струй дымовых газов должно производиться под острыми углами по пути друг к другу. Правильное слияние достигается в том случае, если струи встречаются под прямыми углами, но боковые струи открываются в общий боров при помощи газосливов, зеркало коих совпадает с подом общего борова, а свод с зеркалом газовой реки.

25. Правила устройства сушил многократного насыщения изложены на стр. 69.

П Р И Л О Ж Е Н И Е.

К теории движения газов в металлургических печах.

Предисловие.

Настоящая статья является отчасти дальнейшим развитием и дополнением заметки под таким же приблизительно заглавием, появившейся на страницах «Ж. Р. М. О.» в 1910 году ¹⁾, отчасти же ее повторением, — повторением, допущенным с целью дать в одной статье по возможности все, что относится к гидравлике газового потока в печи, и в виду того, что ссылки на прежнюю работу затруднили бы если не всех, то многих читателей, так как Журнал Р. М. О. за 1910 год стал библиографической редкостью.

Рассмотрению подлежит случай такого движения нагретых газов в металлургических печах, когда эти газы, при соответственном их с размерами печи количестве, не занимают всего поперечного сечения в рабочем пространстве ее, но скользят по своду, не касаясь пода; при этом такое движение газов уподобляется, в некоторой степени, движению воды в канале, если последний представить себе обращенным вверх дном, роль которого в данном случае играет свод печи; газовая струя, движущаяся таким образом, имеет свободную поверхность, лежащую у пода печи и выше него.

Очевидно, что для такого случая все обычные формулы гидравлики для движения жидкости по трубам, как предполагающие всегда сплошное их заполнение, теряют значение и их применение может повести к крупным ошибкам; наоборот, составив формулы для указанного выше движения газа в открытом обращенном вверх дном канале, умея найти положение и вид кривой свободной поверхности этого движения и задавая, в соответствии с этим, положение пода в печи, возможно избежать как мертвых пространств в ней, так и излишнего ее сужения, мешающего свободному прохождению газов, то-есть возможно задать правильные размеры печи, другими словами, рассчитать печь.

Возможность вести расчеты металлургических печей при подобном рода представлении о харак-

тере движения в них газов, указал впервые в металлургии проф. В. Е. Грум-Гржимайло. Это движение, с гидравлической точки зрения, приводит при известного рода предположениях и допущениях к сравнительно простым расчетным формулам, вывод которых и составляет предмет настоящей статьи.

Проверочные расчеты многих печей, находящихся в действии, указывают на правильность и пригодность предлагаемых ниже формул, а это в свою очередь дает основание думать, что как основное представление о характере движения газов, так и предположения, делаемые для вывода и необходимого с практической точки зрения упрощения формул, вполне допустимы и достаточно оправдывают появление настоящей статьи.

Основные положения.

Для возможности применения уравнений гидравлики к движению газов необходимо предположить, что температура их во время движения остается неизменною. Тогда движение каждой движущейся частицы газа зависит только от трех переменных: высоты ее положения, скорости и давления. Предположение об изменении температуры вводит немедленно еще одну переменную и зависимость между всеми четырьмя переменными настолько усложняется, что представить дифференциальные уравнения движения в простом, удобном для интегрирования виде не представляется возможным.

Дело усложняется в этом случае еще и тем обстоятельством, что характер изменения температуры в печи является сам по себе весьма мало исследованным и подверженным таким случайностям, которые исключают возможность какой-либо строгой закономерности.

Эти причины и привели к решению вывести уравнения изучаемого движения для постоянной температуры, т.-е. для идеального случая с тем, чтобы впоследствии, в случае нужды, снабдить окончательные формулы каким-либо практическим коэффициентом. При большой разнице температур

¹⁾ И. Г. Есьман. К вопросу о движении газов в металлургических печах, Ж. Р. М. О. 1910, № 6, стр. 319.

различных отдельных полостей печи не представит труда рассматривать движение в этих полостях совершенно отдельно, задаваясь в каждой из них особой, постоянной для нее температурой.

Несомненно также, что такое же предположение о постоянстве температуры необходимо допустить по тем же причинам и для неподвижной части печных газов, расположенных, согласно с характером изучаемого движения, под свободной поверхностью движущегося потока.

Наконец, весьма естественно предположить, что как окружающий печь холодный воздух, так и движущиеся в нем сильно нагретые продукты горения, являются постоянными газами и подчиняются, поэтому, при постоянной температуре, закону Бойля-Мариотта.

Таким образом, предположения, которые введены во все дальнейшие выводы, могут быть формулированы следующим образом:

1. Температура движущегося газа на рассматриваемом участке печи изменяется настолько незначительно, что ее возможно при изучении движения заменить некоторою среднею постоянною для всего участка и для всей массы движущегося газа, причем, очевидно, все процессы расширения и сжатия газа необходимо считать изотермическими.

2. Температура той части газа, находящегося в канале, которая не принимает участия в движении, точно так же повсюду одинакова и газ этот не смешивается с газом движущимся.

3. Газы, находящиеся в печи, равно как и воздух окружающий печь, подчиняются закону Бойля-Мариотта.

При сделанных предположениях основные законы гидростатики дают ряд зависимостей для покоящейся части газа.

Так как этот находящийся в покое газ подвержен исключительно одной силе тяжести, направленной по вертикали вниз, то, очевидно, изменение гидростатического давления в газе, завися только от силы тяжести, может изменяться только в том же вертикальном направлении и должно быть одинаковым для всех точек, лежащих в одной горизонтальной плоскости. Если две точки в покоящемся газе удалены друг от друга по вертикали на бесконечно малое расстояние dz , то разница гидростатических давлений в этих двух точках dp будет равна весу столба газообразной жидкости, лежащей между рассматриваемыми точками при площади сечения его, равному единице. Обозначая вес единицы объема газа через Δ и предполагая его вследствие малости расстояния постоянным для всего столба высотой dz , мы, согласно указанному выше, можем написать

$$dp = -\Delta dz \dots \dots \dots (a)$$

Знак — указывает на уменьшение давления с увеличением высоты z .

Кроме написанного уравнения, предположение третье позволяет нам написать еще характеристическое уравнение для газа постоянной температуры:

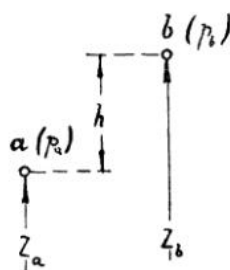
$$pV = \text{Const.} = k,$$

где V есть удельный объем газа. Замечая, что удельный объем и вес единицы объема являются величинами обратными одна другой, характеристическое уравнение для постоянного газа возможно переписать в виде

$$\frac{p}{\Delta} = k \dots \dots \dots (b)$$

Исключая при помощи этого уравнения k в уравнении (a), имеем

$$\frac{dp}{p} = -\frac{dz}{k} \dots \dots \dots (1')$$



Фиг. 1.

Если для какой-либо точки a рассматриваемого газа (Фиг. 1) давление p_a и вес единицы объема Δ_a известны, то известна по уравнению (b) и постоянная k для всего объема газа:

$$= \frac{p_a}{\Delta_a}$$

Интегрируя при этом уравнение (1'), можем определить давление для любой точки b газа, если только известна разность h вертикальных расстояний z_a и z_b обеих точек над координатною горизонтальною плоскостью. В самом деле:

$$\begin{aligned} \ln p_b - \ln p_a &= \ln \frac{p_b}{p_a} = -\frac{1}{k}(z_b - z_a) = \\ &= -\frac{\Delta_a}{p_a} h \end{aligned}$$

Представляя это уравнение в виде показательной функции, разлагая ее в ряд, имеем:

$$\frac{p_b}{p_a} = e^{-\frac{\Delta_a}{p_a} h} = 1 - \frac{\Delta_a}{p_a} h + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta_a}{p_a} h \right)^2 - \dots$$

Обычно член $\frac{\Delta_a}{p_a} h$ представляется весьма малою дробью по сравнению с единицею, так что уже третьим членом написанного ряда возможно пренебречь. В самом деле, в метрических мерах при 0° и атмосферном давлении, Δ_a равно для воздуха 1,288 кг, а величина $\frac{1}{k} = \frac{\Delta_a}{p_a}$ имеет значение $\frac{1,288}{10,000}$; для нагретых газов величина $\frac{1}{k}$ будет соответственно

еще меньше. В то же время высота h в простых металлургических печах не превосходит обычно 50—60 метров (дымовая труба); таким образом максимальная величина $\frac{h}{k}$ достигает значения $\frac{1,288 \times 60}{10,000} = 0,0077$, что оправдывает вполне наше решение пренебречь половиною квадрата этой величины по сравнению с единицей. При сделанных предположениях окончательно имеем

$$p_2 = p_a - \Delta_a h \dots \dots \dots (1)$$

Полученное уравнение совпадает по виду с уравнением гидростатики тяжелой капельной жидкости, т.е. жидкости постоянной плотности, из чего необходимо заключить, что при малых h и, следовательно, малых разностях давлений вес единицы объема возможно повсюду считать одинаковым независимо от давления.

Рассуждая подобным же образом и с теми же допущениями о постоянстве веса единицы объема газа для случая движения газовой струи и предполагая это движение установившимся, возможно для него непосредственно написать уравнение Бернулли в той форме, которая ему придается для жидкости капельной, характеризующейся постоянством удельного веса.

Тем не менее гораздо целесообразнее прийти к этому виду уравнения, исходя из общей дифференциальной формы его с тем, чтобы возможно было отдать себе отчет в степени точности этого вывода.

Как известно, уравнение живых сил для случая жидкого тела, подверженного действию одной только силы тяжести, может быть написано в дифференциальной форме в следующем виде:

$$dz + \frac{dp}{\Delta} + d\left(\frac{v^2}{2g}\right) = 0 \dots \dots \dots (c)$$

Здесь z есть вертикальная координата, т.е. возвышение рассматриваемой частицы над координатною горизонтальною плоскостью, p и Δ , по-прежнему, давление и вес единиц объема в точке нахождения частицы, v — скорость движения и $\frac{v^2}{2g}$ — скоростной напор.

Выражая в уравнении (c) вес Δ через p и k при помощи уравнения (b) и интегрируя его в пределах, соответствующих двум каким-либо положениям рассматриваемой части a_1 и a_2 , получим

$$z_2 - z_1 + k \ln \frac{p_2}{p_1} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} = 0.$$

или

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = -\frac{1}{k} \left[z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right]$$

$$\frac{p_2}{p_1} = e^{-\frac{1}{k} \left[z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right]}$$

Разложив вторую часть равенства в ряд, имеем

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 - \frac{1}{k} \left[z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right] + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{k^2} \left[z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right]^2 - \dots$$

Отбрасывая третий член ряда, заменяя во втором члене k через $\frac{p_1}{\Delta_1}$ и группируя члены, соответствующие начальному и конечному положению движущейся частицы, окончательно получаем уравнение Бернулли в виде, аналогичном уравнению капельной жидкости.

$$z_2 + \frac{p_2}{\Delta_1} + \frac{v_2^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\Delta_1} + \frac{v_1^2}{2g} \dots \dots (2)$$

Здесь Δ_1 , фигурирующее, как усматривается из вывода в первой и во второй части одинаково, соответствует весу единицы объема движущегося газа в начальном его положении.

Ошибка, допущенная при отбрасывании третьего и следующих членов ряда, очевидно будет меньше величины

$$\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta_1}{p_1}\right)^2 \left[z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right]^2$$

Температура в металлургических печах обыкновенно бывает не меньше 1000° , давление весьма близко к атмосферному, соответствующему 10000 кг на квадратный метр, удельный вес продуктов горения весьма близок к удельному весу воздуха, один кубический метр которого при 0° и атмосферном давлении весит 1,29 кг; коэффициент расширения газов равен $\frac{1}{273}$ таким образом вели-

чина $\frac{p_1}{\Delta_1}$ для печей не меньше

$$\frac{10000}{1,29} \left[1 + \frac{1}{273} \cdot 1000 \right] \cong 28400 \text{ метров.}$$

$z_2 - z_1$ не превосходит обыкновенно в печах величины 10—20 метров (напр., доменные газопроводы) и лишь для дымовых труб может достигать 50—60 метров. Скорости движения газов изменяются незначительно и в редких случаях превосходят 10—20 метров в секунду; только американские конструкции печей составляют в этом исключение и в них допускают в последнее время скорости до 50 метров в секунду. Принимая, что крайним верхним и нижним пределом скорости является $v_2 = 20$ метров и $v_1 = 0$ и что, кроме того, предельная разность высот (60 метров) совпадает с пре-

дельною разностью скоростных напоров (чего на самом деле не бывает), нетрудно убедиться, что величина

$$z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

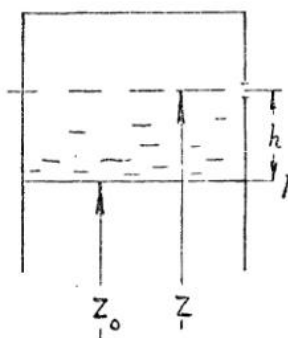
не превосходит 80 метров. Отсюда следует, что допускаемая при замене точного уравнения движения приближенным ошибка не превосходит при нагретых выше 1000° газах величины

$$\frac{1}{2} \left(\frac{80}{28400} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{355} \right)^2$$

Пользуясь выведенными выше формулами (1) и (2), возможно себе составить понятие о характере движения газов в печах, что и будет сделано для различных практически интересных случаев в нижеследующих главах.

Истечение газа из отверстий.

Предположим, что сосуд (фиг. 2), снизу совершенно открытый и сообщающийся с наружным



Фиг. 2.

воздухом, заполнен неподвижным газом нагретым, а потому и более легким, чем наружный холодный воздух; вес единицы объема газа обозначим через Δ , а наружного воздуха через Δ_1 . Горизонтальная поверхность раздела, отделяющая газ от воздуха, т.е. свободная поверхность газа, расположена на высоте z_0 над горизонтальною координатною плоскостью. Рассмотрим распределение давления в подобной газовой среде. В виду неподвижного состояния объема газа, к нему возможно применить уравнение (1) гидростатики, которое и даст нам искомое распределение давления по высоте сосуда в зависимости от известного давления в какой-либо одной из точек его. Такою точкою с известным давлением возможно считать любую точку свободной поверхности, где давление равно давлению наружного воздуха. Обозначим его через p_0 , имеем для произвольной точки газа с вертикальною координатою z

$$p = p_0 - \Delta (z - z_0) \dots \dots \dots (a)$$

Но для наружного воздуха давление точно также изменяется с изменением координаты z и, будучи равным p_0 на высоте z_0 , будет с увеличением z равно

$$p' = p_0 - \Delta_1 (z - z_0) \dots \dots \dots (b)$$

Сравнивая выражения (a) и (b), мы видим, что давление, будучи одинаковым для воздуха и газа

на высоте z_0 свободной поверхности последнего, начинает изменяться с увеличением высоты и притом разность p и p' все время положительна:

$$p - p' = (z - z_0) (\Delta_1 - \Delta) = h (\Delta_1 - \Delta)$$

Таким образом разность давлений на горизонтальной плоскости внутри и снаружи сосуда растет пропорционально увеличению высоты h возвышения взятой горизонтальной плоскости над свободною поверхностью газа. По образному выражению, введенному в практику печей проф. Грум-Гржимайло, печь набирает давление по мере увеличения ее высоты.

Если в печи на высоте h проделать отверстие, то газ устремится, благодаря положительной разнице давлений, изнутри наружу.

Предполагая, что размеры печи по сравнению с размерами отверстия весьма значительны, возможно пренебречь скоростями, образующимися в объеме газа заполняющем печь при истечении из открывшегося отверстия. Точно так же возможно допустить, что убыль газа вследствие истечения через отверстие пополняется соответственным притоком, благодаря чему положение свободной поверхности газа не изменяется и движение имеет установившийся характер. Применяя при этих допущениях уравнение Бернулли в форме, данной ему равенством (2), для двух точек, лежащих на высоте z , — одной впереди отверстия, т.е. с давлением p' , и с другой позади отверстия, с давлением p , — возможно написать

$$z + \frac{p}{\Delta} + \frac{v_c^2}{2g} = z + \frac{p'}{\Delta} + \frac{v^2}{2g}$$

Здесь через v обозначена скорость в отверстии непосредственно при выходе в наружный воздух и через v_c скорость в сосуде, которая, согласно сделанному выше допущению, может быть принята равною нулю. По исключению в обеих частях уравнения z имеем:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{2g \frac{p - p'}{\Delta}} = \sqrt{2gh \frac{\Delta_1 - \Delta}{\Delta}} = \\ &= \sqrt{2gh (\lambda - 1)} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

Здесь через λ обозначено отношение Δ_1 к Δ , — объемных весов холодного и нагретого газа.

Объем газа, вытекающего через отверстие в секунду, при площади отверстия равной F' и коэффициенте расхода μ , будет равен:

$$Q = \mu F' v = \mu F' \sqrt{2gh (\lambda - 1)} \dots \dots \dots (4)$$

Истечение газа из отверстия может соответствовать так-называемому истечению под уровень, если горячий газ течет в помещение, наполненное газом той же температуры, но лишь меньшего да-

вления, обусловленного меньшей толщиной слоя этого газа. Пусть имеется полость горячего газа с объемным весом Δ и рядом с ней другая, где свободная поверхность такого же газа лежит выше на $h_1 - h_2$ (фиг. 3). Требуется найти разность давлений на уровне $c - c$ обеих полостей, обуславливающую течение газа из одной полости в другую. Назовем давление в холодном газе, объемного веса Δ_i , на уровне $a - a$ через p_i , тогда, очевидно, давления горячего газа на соответствующих уровнях будут равны

$$\left. \begin{aligned} p_a &= p_i \\ p_b &= p_i - \Delta_i (h_1 - h_2) \\ p_c &= p_i - \Delta h_1 \\ p_c' &= p_b - \Delta h_2 = p_i - \Delta_i (h_1 - h_2) \end{aligned} \right\} \dots (a)$$

откуда

$$\frac{p_c - p_c'}{\Delta} = \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} (h_1 - h_2) = (\lambda - 1) h$$

где λ , попрежнему, обозначает отношение Δ_i к Δ .

Но согласно формуле (3) указанная разность давлений обуславливает собою скорость течения через отверстие, которая очевидно, попрежнему будет равна:

$$v = \sqrt{2gh(\lambda - 1)} \dots (3)$$

Таким образом в течении под уровень расположение отверстий по высоте в горячем газе, не играет роли, а только лишь разность уровней обеих свободных поверхностей газа. Это как раз соответствует тому, что наблюдается в гидравлике капельной жидкости. Формулы (3) и (4) оказываются одинаково пригодными для истечения как в полость холодного газа, так и в полость горячего при соответственном лишь изменении значения h .

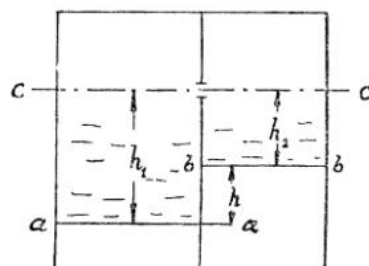
Как видно из формулы (4) высота h зависит от Q , F и μ и если изменится какая-либо из трех этих величин, например, вследствие изменения количества притекающего газа или же изменения площади отверстия и сопротивления в нем (напр., вследствие прикрывания заслонки), то в полости положение свободной поверхности под отверстием, т. е. высота h будет изменяться до тех пор, пока не будет соответствовать формуле (4).

Если вместо сосуда вообразить себе печь (напр., вроде употребляемых на фарфоровых заводах), наполненную горячим продуктами горения, поступающими через особые отверстия из топки в определенном количестве в секунду Q и предположить, что для выхода газов в дымовую трубу в куполе печи имеется отверстие определенного сечения, прикрываемое заслонкою, то очевидно к этому случаю вполне применимы все вышеприведенные рассуждения и формулы (3) и (4).

Предполагая, что в правильной конструкции вся печь до самого пода должна быть заполнена

горячими газами, мы из формулы (4) имеем возможность определить необходимое для этого расстояние h от пода до отверстия: при большей высоте печи под не будет прогреваться, при меньшей высоте — на поду давление газов будет больше давления наружного воздуха на той же горизонтали, что поведет к выходу этих газов в окружающее печь рабочее пространство через все рабочие отверстия, находящиеся у пода.

Топка, где образуются горячие газы, направляющиеся в печь, точно также до известной степени аналогична рассмотренному сосуду, наполненному легким газом, так как низ топки через колосниковую решетку сообщается с атмосферой и имеет, следовательно, на этом уровне давление, равное наружному. По мере поднятия газов, разность между внутренним и наружным давлениями будет возрастать и, чем больше требуется давление в топке при выходе в печную полость, по сравнению с давлением наружного воздуха, тем, очевидно, больше должна быть высота топочной полости.



Фиг. 3.

В применении к горячим газам формулу (4) возможно упростить в том случае, если удельный объем газов считать одинаковым с удельным объемом воздуха той же температуры. При этом очевидно,

$$\Delta = \Delta_i \frac{1 + \alpha t_i}{1 + \alpha t}$$

где t_i есть температура наружного воздуха, а t температура газов

$$(\lambda - 1) = \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} = \frac{\alpha(t - t_i)}{1 + \alpha t_i} = \frac{t - t_i}{\frac{1}{\alpha} + t_i}$$

принимая, что $\frac{1}{\alpha} = 273$ и, наконец, делая предположение, — не влекущее за собой большой ошибки, — что $t_i = 0$, имеем окончательно

$$\lambda - 1 = \frac{t}{273}$$

При этом формула (4) принимает вид

$$Q = \mu F \cdot \sqrt{\frac{2g}{273}} \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{h} = 0,268 \mu F \sqrt{h} \sqrt{t}.$$

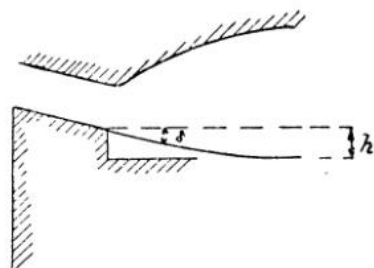
Коэффициент расхода μ зависит в высокой степени от формы отверстия. Соответственных опытов в этом направлении совершенно не имеется в литературе и о величине этого коэффициента возможно судить лишь по аналогии с такими данными, которые найдены для воды, так как имеются указания и наблюдения, что коэффициенты истечения для воздуха обыкновенной температуры и воды мало отличаются между собою. Принимая, что те же коэффициенты остаются и для газов высокой температуры, и что для большинства случаев отверстие представляет собою цилиндрическую насадку, возможно считать, что в среднем

$$\mu = 0,60.$$

При этом

$$h = \frac{273}{2g} \frac{Q^2}{\mu^2 F^2 t} = 26,5 \frac{Q^2}{F^2 t} \dots \dots (5)$$

Несколько отличное от описанного применение формулы истечения газов представляется в случае, которому возможно дать название «газового фонтана»; при этом задача может быть формулиро-



Фиг. 4.

вана в следующем виде. Из отверстия вытекает струя горячего газа с наклоном вниз под углом δ в неподвижную среду менее нагретого воздуха (фиг. 4); при заданной скорости истечения v требуется определить, на какой глубине под отверстием должен быть расположен под печи, чтобы струя горячего газа могла его коснуться.

Благодаря тому, что вытекающая струя движется свободным движением, каждая частица ее будет двигаться, не подвергаясь давлению со стороны соседних, а лишь испытывая давление со стороны неподвижной среды. Это последнее давление сведется к силе, направленной снизу вверх, подобно давлению жидкости на тело в нее погруженное. В результате частица горячего газа будет двигаться с начальной скоростью v под влиянием двух сил: силы тяжести и силы указанного давления.

Принимая с точностью, более чем достаточною для практики, как то выяснено выше, что вес единицы объема как движущегося, так и неподвижного газа не изменяется с высотой, необходи-

мо считать, что равнодействующая сил, действующих на движущуюся частицу, постоянна. При этом, очевидно, частица будет описывать параболу, вершина которой и является искоюю наиминимею точкою, лежащую ниже отверстия на глубине, определяемой известною формулою

$$h = - \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2j}$$

В формуле j обозначает ускорение равнодействующей. Знак минус взят в виду желания заметить в обычной формуле высоту вершины параболы глубиною.

Вес движущейся частицы горячего газа, принимая ее объем равным единице, равен Δ .

Давление со стороны более холодного газа, равное весу этого газа в объеме движущейся частицы, направленное противоположно силе тяжести, будет равно Δ_i .

Равнодействующая сила, отнесенная к единице объема, равна $\Delta - \Delta_i$, замечая, что масса единицы объема движущегося газа равна $\frac{\Delta}{g}$, имеем, что ускорение найденной равнодействующей силы будет

$$j = \frac{\Delta - \Delta_i}{\frac{\Delta}{g}} = g(1 - \lambda).$$

При этом

$$h = - \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g} \frac{1}{1 - \lambda} = \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g} \frac{1}{\lambda - 1}$$

Выражение $\frac{1}{\lambda - 1}$ для печных газов и воздуха попрежнему может быть выражено через соответствующие температуры, при чем

$$h = \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g} \frac{273 + t_i}{t - t_i} \dots \dots (5')$$

Таким образом глубина h тем больше, чем меньше разнится температура печи от температуры струи.

Предполагая, как самый невыгодный случай, которому должна удовлетворять печь, что температура t_i есть температура наружного воздуха и принимая, что она равна нулю, получим еще более простое выражение

$$h = \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g} \frac{273}{t} \dots \dots (5'')$$

В этом уравнении v , в свою очередь, может быть выражено по формуле (3), в зависимости от обстоятельств, обуславливающих истечение из камеры с горячим газом, разобранных уже выше. Для правильного применения формулы (3) необходимо иметь в виду, что даваемая ею скорость является теоретическою и для применения в фор-

муле (5') должна быть снабжена коэффициентом скорости, зависящим от формы отверстий; для отверстия, представляющего форму цилиндрической насадки, наиболее часто встречающегося на практике, этот коэффициент может быть принят равным 0,64.

Истечение через водослив.

Явление истечения через водослив (точнее газослив) возможно себе представить при движении газов наиболее правильным образом в следующем виде:

Имеется нисходящий, установившийся поток нагретого газа неограниченных в ширину размеров с весьма медленным движением со скоростью v_0 (см. фиг. 5). Поток, достигнув горизонтального порога DD_1 одинаковой повсюду ширины B в направлении перпендикулярном к плоскости чертежа, переливается через последний слоем некоторой толщины, после чего уходит вверх; размеры и устройство выходного отверстия таковы, что весь газ может уйти так называемым свободным движением, т.е. без повышения давления впереди отверстия и образования подпора. В этом случае движение газа будет аналогично движению капельной жидкости по водосливу, если последний повернуть в плоскости чертежа на 180° .

Газ, до входа на порог не имеющий горизонтальной составляющей скорости, начнет, благодаря разности давлений и высоте, приобретать скорость с соответственным утонением газового слоя; если длина порога DD_1 достаточно велика, то на нем в результате установится, начиная с некоторого сечения, течение параллельными струйками.

Рассмотрим два сечения через газовый поток; одно ab в том месте, где газ еще не имеет горизонтальной составляющей скорости, а другое cd — там, где возможно уже считать, что движение совершается параллельными струйками, при чем скорость этого движения равна v .

Для движения всего описанного газового потока, по аналогии с жидкостью капельною, возможно было бы, конечно, непосредственно применить уравнение Даниила Бернулли для двух указанных сечений.

Однако для лучшего усвоения происходящих при движении явлений и понимания сущности образования скорости, разобьем весь поток на элементарные струйки и рассмотрим движение наиболее из них характерных, а именно струйки bd горизонтальной, движущейся вдоль поверхности порога, и струйки ac , движущейся по свободной поверхности.

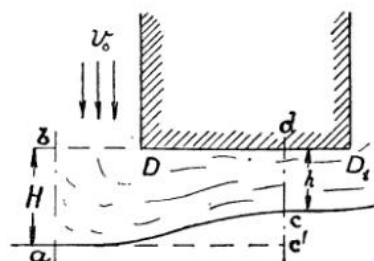
Как известно, уравнение Бернулли (ур. 2) выражает собою равенство полных напоров для первого и второго положения движущейся частицы,

понимая под полным напором сумму напоров или высот геометрической, пьезометрической и скоростной.

Если пренебречь скоростью вертикального движения v_0 , весьма малою по сравнению со скоростью горизонтального движения v , то уравнение Бернулли для двух рассматриваемых частиц напишется соответственно в виде:

$$\left. \begin{aligned} z_b + \frac{p_b}{\Delta} &= z_b + \frac{p_d}{\Delta} + \frac{v^2}{2g} \\ z_a + \frac{p_a}{\Delta} &= z_c + \frac{p_c}{\Delta} + \frac{v^2}{2g} \end{aligned} \right\} \dots \dots (a)$$

здесь значки при z и p обозначают соответственно те точки, для которых эти последние величины должны быть взяты; Δ — вес единицы объема движущегося газа, принимаемый одинаковым для всего объема газа согласно с уже указанным выше.



Фиг. 5.

Из уравнений (a) мы имеем соответственно для первой и второй струйки:

$$\left. \begin{aligned} \frac{v^2}{2g} &= z_b - z_d + \frac{p_b - p_d}{\Delta} \\ \frac{v^2}{2g} &= z_a - z_c + \frac{p_a - p_c}{\Delta} \end{aligned} \right\} \dots \dots (b)$$

Из последних равенств видно, что разность напоров геометрического и пьезометрического в начальном и конечном положении каждой струйки идет на образование скорости; при этом, несомненно, пренебрегается сопротивлением движению, что в последствии придется компенсировать введением численного коэффициента.

Для нахождения входящих в выражения (b) давлений обратим внимание на то, что ниже свободной поверхности движущегося газа находится неподвижный газ или воздух, к объему которого возможно применить уравнение гидростатики. Точно также необходимо считать, что и в объеме нагретого газа, до входа его на водослив, возможно применить уравнение гидростатики, благодаря весьма малой скорости движения v_0 .

Приняв это во внимание, давление движущегося газа в точке a возможно считать равным давлению неподвижного газа в той же точке.

$$p_a = p_i \dots \dots (c)$$

Давление в точке b , согласно с ур. (1) будет при этом равно:

$$p_b = p_i - \Delta H \dots \dots \dots (d)$$

H —вертикальное расстояние свободной поверхности газа от плоскости порога, может быть названо геометрическим напором на водосливе

Таким же точно образом давление движущегося газа в точке c , равное давлению в той же точке неподвижного газа, будет равно, согласно фигур 1 и 5 и уравнению (1).

$$p_c = p_i - \Delta_i c c' = p_i - \Delta_i (H - h) \dots \dots \dots (e)$$

где Δ_i есть вес единицы объема неподвижного газа и h —высота слоя движущегося газа в сечении cd . Так как, далее, движение в сечении cd по заданию предполагается параллельное, то давления в нем следует считать распределенными по законам гидростатики, а это позволит нам применить ур. (1) для того, чтобы выразить давление в точке d через давление в точке c :

$$p_d = p_c - \Delta h \dots \dots \dots (f)$$

Принимая во внимание найденные зависимости (e), (d), (f) и замечая, что

$$z_b = z_d$$

и

$$z_a - z_c = -(H - h)$$

мы можем первое уравнение (b) переписать в виде

$$\begin{aligned} \frac{v^2}{2g} &= \frac{p_i - \Delta H - p_c + \Delta h}{\Delta} = \\ &= \frac{p_i - \Delta H - p_i + \Delta_i (H - h) + \Delta h}{\Delta} = \\ &= \frac{\Delta_i (H - h) - \Delta (H - h)}{\Delta} = (H - h) \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} \dots \dots \dots (g) \end{aligned}$$

и второе:

$$\begin{aligned} \frac{v^2}{2g} &= -(H - h) + \frac{p_i - p_i + \Delta_i (H - h)}{\Delta} = \\ &= (H - h) \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} \dots \dots \dots (g) \end{aligned}$$

Таким образом разность напоров,—а следовательно, и скорость v для струек bd и ac —оказалась одинаковою и нетрудно аналогичным образом убедиться, что и для всех промежуточных струек она точно также не будет отличаться от величины найденной нами для крайних струек. Отсюда следует, что при движении свободном от сопротивлений найденная нами скорость v есть скорость всего рассматриваемого нами потока на водосливе. Из равенства (g) имеем

$$v = \sqrt{2g(H - h) \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta}} = \sqrt{2g(H - h)(\lambda - 1)} \quad (6)$$

где, попрежнему, $\lambda = \frac{\Delta_i}{\Delta}$.

При этом теоретический объем газа Q_t , протекающий через порог толщины h и ширины B в одну секунду будет равен

$$Q_t = Bh \sqrt{2g(H - h)(\lambda - 1)} \dots \dots \dots (7)$$

Введя, согласно Буссиньку предположение, что высота h на пороге водослива соответствует при установившемся движении наибольшему возможному Q_t для данного H , имеем

$$\frac{dQ_t}{dh} = \left(\sqrt{H - h} - \frac{h}{2\sqrt{H - h}} \right) B \sqrt{2g(\lambda - 1)} = 0$$

Это приводит нас к уравнению:

$$h = \frac{2}{3} H \dots \dots \dots (8)$$

$$H = \frac{3}{2} h \dots \dots \dots (8')$$

Вводя эти значения для h и H в уравнение (7), получим

$$Q_t = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{3}} B H \sqrt{2gH(\lambda - 1)}$$

$$Q_t = \sqrt{\frac{1}{2}} B h \sqrt{2gh(\lambda - 1)}$$

Полученные формулы являются теоретическими так как в них не приняты во внимание сопротивления движению. Аналогично с практикою водослива для капельных жидкостей, сопротивления возможно учесть введением некоторого практического коэффициента; при этом предыдущие формулы примут вид:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{3}} \mu' B H \sqrt{2gH(\lambda - 1)} = \\ &= m' B H \sqrt{2gH(\lambda - 1)} \dots \dots \dots (9') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{\frac{1}{2}} \mu B h \sqrt{2gh(\lambda - 1)} = \\ &= m' B h \sqrt{2gh(\lambda - 1)} \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

где коэффициенты μ и μ' могут оказаться не равными между собою, так как с переходом к действительному течению газа уравнение (7) точно также должно быть снабжено некоторым коэффициентом, который может несколько изменить зависимость (8) и (8').

Представим формулу (9), имеющую вид более удобный для практических применений, нежели формула (9'), в более простом виде, придерживаясь снова уже сделанных нами выше допущений, что движущаяся часть газа и неподвижная имеют один и тот же химический состав, при чем отношение весов заменяется отношением абсолютных температур; допуская затем, попрежнему, что размеры печи должны удовлетворять наименее выгодному случаю (h наиме лее), когда под движущуюся струю находится слой холодного наружного воздуха, температуру которого возможно принять равную нулю, мы получим:

$$\lambda - 1 = \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} = \frac{\dots}{273}$$

где t есть температура (по Ц) печных газов. При этом

$$Q = Bh \sqrt{2gh} \sqrt{\frac{t}{273}} = MB \sqrt{h^3 t} \dots (10)$$

$$h = A \sqrt[3]{\frac{Q}{B^2 t}} \dots (11)$$

Полученную формулу возможно пользоваться для определения того максимального расстояния от пода до порога, которое может быть допущено конструктором при заданной величине Q без опасения не получить непосредственного прикосновения горячих газов к поду.

Как видно высота h вдвойне зависит от температуры печных газов: как явным образом, так и неявным через Q .

Для конкретного суждения о том, какие численные значения может иметь коэффициент A , возможно прибегнуть к аналогии с движением воды и воспользоваться для этого опытами Базена.

При движении газа вместо воды, возможно, с одной стороны, ожидать некоторого уменьшения сопротивления вследствие большей по сравнению с водою подвижности газа и, с другой стороны, появления некоторого добавочного сопротивления на свободной поверхности от трения между движущейся и неподвижной частью газа, которыми при

движении воды считают возможным пренебрегать вследствие большой разницы удельных весов воды и воздуха.

Совпадение размеров, вычисленных по формуле (11) при этих предположениях о величине численных коэффициентов, с наблюдаемыми на практике дает основание предполагать, что вводимая аналогия между водою и газами вполне допустима и что, следовательно, обе указанные причины, изменяющие сопротивление в газе по сравнению с водою, компенсируют друг друга. Как известно, по Базену для водослива, имеющего в направлении движения ширину E и для случая, когда скорости подхода может быть принята равной нулю, возможно для коэффициента m' принять

$$m' = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{3}} \mu' = \left(0,70 + 0,185 \frac{H}{E} \right) \left(0,405 + \frac{0,003}{H} \right)$$

Считая, что $\mu = \mu'$, ниже приведена таблица коэффициентов m' , m , M и A , вычисленная для высоты h на пороге в печах от 0,30 до 1,00 метра при ширине порога E , изменяющейся от 0,50 метра до бесконечности.

Таблица показывает, что коэффициент A меняется довольно слабо с изменением h , что облегчает задачу определения h из формулы (11), так как для этого возможно задаться приблизительным

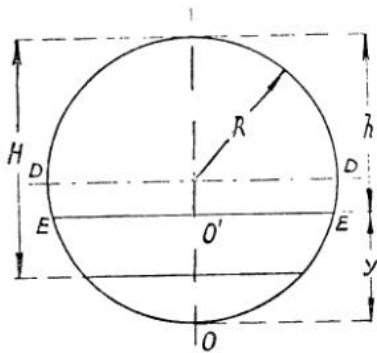
Таблица I.

h	0,30					0,40					0,50				
	H					H					H				
	0,45					0,60					0,75				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
m'	0,357	0,323	0,306	0,293	0,288	0,378	0,333	0,310	0,296	0,287	0,400	0,343	0,314	0,298	0,283
m	0,655	0,594	0,562	0,541	0,529	0,695	0,611	0,569	0,544	0,527	0,735	0,630	0,576	0,547	0,525
M	0,175	0,159	0,151	0,145	0,142	0,186	0,164	0,152	0,146	0,141	0,197	0,169	0,154	0,147	0,141
A	3,20	3,41	3,52	3,62	3,67	3,07	3,34	3,51	3,61	3,69	2,95	3,27	3,48	3,59	3,69
h	0,60					0,75					1,00				
	H					H					H				
	0,90					1,125					1,50				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
m'	0,424	0,353	0,320	0,299	0,286	0,455	0,371	0,328	0,303	0,286	0,535	0,398	0,340	0,307	0,285
m	0,735	0,649	0,588	0,549	0,525	0,835	0,681	0,603	0,556	0,525	0,983	0,731	0,625	0,564	0,524
M	0,220	0,174	0,157	0,147	0,141	0,224	0,183	0,162	0,149	0,141	0,263	0,196	0,168	0,151	0,140
A	2,75	3,20	3,45	3,59	3,69	2,71	3,06	3,36	3,56	3,69	2,43	2,95	3,28	3,52	3,70

значением Δ с тем, чтобы определив при этом h , найти из таблицы более точное и окончательное значение Δ .

Некоторые производства требуют прохода газов во вращающемся пространстве цилиндрического сечения. Задача определения допустимого наибольшего h в данном случае усложняется тем обстоятельством, что ширина водослива B , прежде постоянная, теперь делается зависимою от H и h ; зависимость эта настолько сложного характера, что решение задачи, не представляя в теоретическом отношении особой трудности, является все же почти бесполезным для практического применения. Тем не менее и здесь возможны более простые решения, если только допустить некоторые упрощения, сущность которых будет видна из дальнейшего изложения.

Так как распределение давлений не зависит от вида поперечного сечения потока, то, очевидно, что



Фиг. 6.

скорость на подобного рода водосливе кругового сечения будет выражаться попрежнему формулой (6), и теоретический объем газа будет равен

$$Q_t = F \sqrt{2g(H-h)} (\lambda - 1) \dots \dots \dots (7')$$

где F есть площадь живого сечения струи на водосливе.

Для того, чтобы выразить эту площадь через высоту h , заменим нижнюю полуокружность сечения (фиг. 6) параболою таким образом, чтобы вершина этой параболы совпадала с нижней точкою круга, а ветви ее проходили через концы горизонтального диаметра DD . Уравнение этой параболы, очевидно, напишется в виде.

$$x^2 = R(2R - h)$$

где x горизонтальная ее координата.

При этом, принимая во внимание выражение для площади сегмента параболы EOE , будем иметь

$$F = \pi R^2 - \frac{2}{3} EE' \times OO' = \pi R^2 - \frac{4}{3} \sqrt{R} (2R - h)^{3/2} \dots (12)$$

Для удовлетворения условия максимального расхода, очевидно, должно быть попрежнему справедливо равенство

$$\frac{dQ_t}{dh} = 0.$$

Имея в виду, что R постоянно, мы видим, что это равенство дает:

$$\frac{d}{dh} [\pi R^{3/2} - \frac{4}{3} (2R - h)^{3/2}] \sqrt{H - h} = 0.$$

$$2 \sqrt{2R - h} \sqrt{H - h} - \frac{[\pi R^{3/2} - \frac{4}{3} (2R - h)^{3/2}]}{2 \sqrt{H - h}} = 0.$$

$$4(H - h) \sqrt{2R - h} = \pi R^{3/2} - \frac{4}{3} (2R - h)^{3/2}$$

Если допустить, что газы входят на порог сечением весьма близким к кругу, то

$$H \sim 2R$$

и тогда

$$\frac{16}{3\pi} (2R - h)^{3/2} = R^{3/2}$$

откуда

$$h = \sim 0,65H \dots \dots \dots (13')$$

$$H = 1,54h \dots \dots \dots (13)$$

С небольшою погрешностью возможно принять, что зависимость между H и h , данная формулами (13') и (13), будет близко осуществляться также и в том случае, если H не будет вполне точно равно диаметру трубы, а только лишь будет приближаться к этой величине. Имея это в виду, вставляя значения (13) и (12) в формулу (7') и, наконец, делая все прежние допущения относительно величины члена $\frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} = \lambda - 1$, возможно найти зависимость между h и Q . Эта зависимость, хотя и несколько более сложного характера, нежели та, которая получена выше (11) для водослива прямоугольных печей, но все же дает возможность определять h в каждом частном случае, решая задачу постепенным приближением. Несомненно, необходимо при этом снабдить формулу численным коэффициентом, который за неимением других данных (не только для газа, но и для воды) по необходимости следует брать таким же, как то дано выше для прямоугольного водослива на основании опытов Базена.

Решение задачи о водосливе кругового сечения приведено здесь в виде примера, для указания, каким образом возможно решить задачу в частном случае.

Кроме случая движения по полному водосливу, т.-е. такому, в котором движение не зависит совершенно от подпора снизу, возможно себе также вообразить в практике печей случаи, когда движение газа в печи уподобляется движению по непол-

ному водосливу, т.-е. когда обстоятельства движения позади водослива начинают влиять на скорость на самом водосливе. Этот случай может быть также разрешен сравнительно весьма просто применением формул для движения по неполному водосливу капельной жидкости с соответствующую их переработкою. Так как, однако, для применения этих формул весьма важно ознакомиться в начале с обстоятельствами равномерного и неравномерного движения газов в печных каналах, то мы и обратимся сначала к их изучению с тем, чтобы вернуться впоследствии и к неполному водосливу.

Равномерное движение газа.

Равномерное движение в открытом канале, как известно, может осуществляться вполне правильно только при постоянном уклоне дна, а в данном случае потолка печи, и призматической ее форме повсюду одинакового сечения. Кроме того, необходимо придать потолку достаточную длину для того, чтобы подобное равномерное движение могло установиться вслед за входом газа в печь через входное отверстие на потолок и необходимом при этом изменении скорости.

Выделим в струе газа, движущейся при указанных условиях, участок длиной l двумя нормальными к направлению движения сечениями ab и cd (фиг. 7). Так как движение равномерное, то толщина e газовой струи, соответствующая обычному понятию глубины потока капельной жидкости будет одинакова по всей длине l . Угол наклона печи к горизонтальной линии повсюду одинаков и равен i_0 .

По заданию, для равномерного движения, мы имеем, что средние скорости в обоих сечениях одинаковы. Кроме того, необходимо предположить, вследствие тождественности всех условий для движения в обоих рассматриваемых сечениях, что и распределение скоростей в них будет также одинаково, т.-е. что не только скорости средние, но и скорости отдельных элементарных струек точно так же не будут изменяться. Это обстоятельство позволяет вычислить падение энергии струи при переходе от первого сечения ко второму по энергии для любой из элементарных струек, аналогично с тем, как это принято в гидравлике капельной жидкости.

В самом деле, падение энергии w_{ac} для струйки ac и w_{bd} для струйки bd будут соответственно равны:

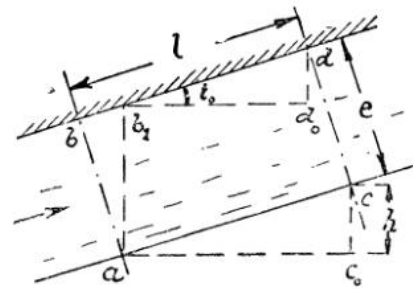
$$\left. \begin{aligned} w_{ac} &= \left(\frac{p_a}{\Delta} + \frac{v_{ac}^2}{2g} \right) - \left(h + \frac{p_c}{\Delta} + \frac{v_{ac}^2}{2g} \right) = \frac{p_a - p_c}{\Delta} - h \\ w_{bd} &= \left(\frac{p_b}{\Delta} + \frac{v_{bd}^2}{2g} \right) - \left(h + \frac{p_d}{\Delta} + \frac{v_{bd}^2}{2g} \right) = \frac{p_b - p_d}{\Delta} - h \end{aligned} \right\} \dots (a)$$

Здесь v_{ac} и v_{bd} обозначают скорости обеих струек, одинаковые в обоих сечениях, h есть превышение точки d над точкою b вследствие уклона свода; это превышение будет иметь и точка c над точкою a вследствие одинаковой повсюду толщины e . Рассуждая аналогично тому, как это было указано в предшествующей главе, и применяя те же обозначения для неподвижного газа p_i и Δ_i , можно написать

$$\left. \begin{aligned} p_a &= p_i \\ p_c &= p_i - \Delta_i h \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (b)$$

Делая вполне естественное предположение, что движение газа происходит параллельными струйками, необходимо принять также вытекающее из этого предположения следствия, что давления во взятых сечениях, нормальных к направлению движения, будут распределяться по законам гидростатики. Основываясь на этом и на равенствах (b), необходимо, очевидно, написать:

$$\left. \begin{aligned} p_b &= p_a - \Delta a b_i = p_i - \Delta e \cos i_0 \\ p_d &= p_c - \Delta c c_i = p_i - \Delta_i h - \Delta e \cos i_0 \end{aligned} \right\} \dots \dots (c)$$



Фиг. 7.

Внося значения уравнений (b) и (c) в уравнения (a) и замечая, что

$$h = l \sin i_0 \dots \dots \dots (d)$$

имеем:

$$\left. \begin{aligned} w_{ac} &= \frac{\Delta_i l \sin i_0}{\Delta} - l \sin i_0 = \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} l \sin i_0 \\ w_{bd} &= \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} l \sin i_0 \end{aligned} \right\} \dots \dots (e)$$

Падение энергии на единицу веса движущейся струи или так называемое падение напора, данное уравнением (e), затрачивается на преодоление сопротивлений движению, сводящихся в данном случае к трению.

Несмотря на существование опытов над сопротивлением газов в трубах, нельзя считать законы этого сопротивления достаточно изученными. Однако, эти опыты указывают все же, что законы сопротивления движению газов аналогичны с такими же для капельных жидкостей в особенности в тех случаях, когда термодинамические процессы

не оказывают влияния на движение, что как раз имеет место в рассматриваемом нами случае движения газа при неизменной температуре. Это заключение позволяет думать, что и для движения газов в открытых каналах существует подобная же аналогия.

Основываясь на этом, необходимо прийти к заключению, подтверждаемому также и опытами наблюдениями, что движение газов, подобно жидкостям каплевым, должно подчиняться различным законам, в зависимости оттого, происходит ли это движение с образованием или без образования вихрей.

Опыты и теоретические исследования Hagen'a, Reynolds'a, Poiseuil'я, Darcy доказали, что при движении жидкости по трубам безвихревое движение устанавливается при скоростях, меньших некоторой определенной для данной трубы скорости, называемой обыкновенно критической. Ближайшее рассмотрение вопроса указывает на существование двух критических скоростей—верхней и нижней. Первая разделяет область движений абсолютно безвихревых, при которых вихри даже искусственно образованные затухают и крайняя шероховатость стенок не может повлечь их появления, от области, в которой вихри при наличии благоприятных условий могут возникать в большей или меньшей степени. По мере увеличения скорости против низшей критической скорости возможность безвихревого движения уменьшается. Верхняя критическая скорость характеризует собою тот предел, за которым безвихревое движение не возникает ни при каких обстоятельствах и даже при полном отсутствии шероховатости стенок движение протекает с вихрями.

Опыты и теоретические соображения, касающиеся определения величины критической скорости, указывают, что она зависит не только от размеров трубы, но и от плотности движущейся жидкости и ей обратно пропорциональна. Это дает основание предполагать, что в то время, как величины критических скоростей для жидкостей капленых получают весьма небольшие, практически не имеющие никакого интереса, для газов, плотность которых значительно меньше, они могут в некоторых случаях возрасти до пределов, встречающихся на практике. Это обстоятельство, на которое до сего времени, насколько известно, нигде не было обращено внимание, может иметь весьма большое значение, так как может повести к применению обычных формул гидравлики предполагающих вихревое движение для случаев, когда на самом деле вихрей не образуется и само движение протекает по совершенно отличному от

обычного случая законам. Устранение ошибки при этом возможно лишь при внимательном изучении каждого отдельного случая.

Величина критических скоростей дана Reynolds'ом для капленых жидкостей на основании теоретических соображений применением закона подобия; в виду этого следует с полным основанием предположить, что те же формулы не потеряют своего значения и для жидкостей газообразных. Как известно, формулы Reynolds'a имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} v_l &= \frac{0,204}{d} \cdot \frac{\eta}{\gamma} \\ v_h &= \frac{1,29}{d} \cdot \frac{\eta}{\gamma} \end{aligned} \right\} \dots \dots (14)$$

где v_l и v_h —соответственно нижняя и верхняя критические скорости в метрах, d —диаметр трубы в метрах, η —коэффициент вязкости жидкости в абсолютных единицах, γ —вес единицы объема жидкости в граммах на куб. сант. Приведенные формулы для критических скоростей указывают на то, что разница между нижнею и верхнею скоростями сравнительно весьма значительна; в промежутке между ними действительное движение будет протекать по вихревому или безвихревому закону в зависимости от большей или меньшей шероховатости стенок данной трубы. Таким образом промежуточная скорость, соответствующая действительному переходу от вихревого движения к безвихревому, является функцией степени шероховатости стенок трубы. Она может быть названа предельною скоростью. Biel¹⁾ предлагает для определения предельной скорости v_n пользоваться формулою:

$$v_n = \frac{\epsilon}{\sqrt{d}} \cdot \frac{\eta}{\gamma} \dots \dots (14')$$

где, d η и γ имеют прежнее значение, а ϵ есть некоторый опытный коэффициент шероховатости равный 17 для гладких оцинкованных труб, 5,6— для труб негладких чугунных; для каналов кирпичных у Biel'я значений не дается, но имея в виду даваемую им классификацию степени шероховатости, наиболее вероятным следует для этого случая признать коэффициент равным приблизительно 3. При этом значение ϵ и при даваемых Biel'ем значениях $\frac{\eta}{\gamma}$ для воздуха возможно получить значения предельных скоростей для разных диаметров и температур приведенные в таб. II.

1) Biel. Druckhöhenverlust bei der Fortleitung tropfbarer und gasförmiger Flüssigkeiten. Mitteilungen über Forschungsarbeiten. Heft 44.

Т а б л и ц а II.

t	$\frac{\eta}{\gamma}$	ε	d													
			0,004	0,006	0,008	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
12°	0,16	17	43	35	30	27	19	13,5	11	9,5	8,5	6	4,3	3,5	3	2,7
		3	7,7	6,2	5,3	4,8	3,5	2,4	1,9	1,7	1,5	1,0	0,76	0,62	0,52	0,48
1200°	2,36	17	632	515	442	393	280	199	164	140	135	87	63	52	44	39
		3	114	91	78	71	52	35	28	25	22	15	11	9,1	7,8	7,1

При желании применить эту таблицу для труб некруглой формы или для каналов открытых, как то имеет место для рассматриваемого нами случая движения газов в металлургических печах, возможно считать, что величины предельных скоростей одинаковы для всякой формы сечения каналов, если только их гидравлический радиус R равен гидравлическому радиусу соответствующей круглой трубы, для чего, как известно, диаметр последней должен определяться уравнением:

$$d = 4R.$$

Так, например, для газовой струи в печи шириною в 1 метр и толщиной в 0,3 метра, имеющей нижнюю свободную поверхность, средней гидравлический радиус будет равен $\frac{0,3}{0,3+0,3+1,0} = 0,187$ м, что соответствует трубе диаметром в 0,750 м и предельной скорости около 8 метров ¹⁾ согласно таблице для $t = 1200^\circ$. Величина полученной скорости близка к тем, которые встречаются в металлургических печах; таким образом при расчетах, касающихся движения газов в металлургических печах может оказаться необходимым, в противоположность тому, что мы имеем для капельных жидкостей, применять формулы не только вихревого, но и безвихревого движения в зависимости от размеров печей, температуры и физико-химических свойств данных продуктов горения.

Цифры вышеприведенной таблицы для критических скоростей не были проверены опытом для газов вообще и для сильно нагретых в особенности, а потому на них следует смотреть, как на первое приближение в попытке подойти ближе к рассматриваемому вопросу; тем не менее эти таблицы в связи с приведенными рассуждениями дают возможность сделать ряд следующих заключений:

а) При движении газов в металлургических печах, как и при движении жидкостей в трубах и

¹⁾ Предполагается для простоты, что вязкость и вес единицы объема продуктов горения в печи и воздуха одинаковы.

каналах, должна существовать некоторая скорость которую возможно назвать нижней критической скоростью и которая является верхним пределом для области движения исключительно безвихревого, и некоторая другая скорость, предельная безвихревая, которая является нижним пределом движения исключительно вихревого. Для скоростей, лежащих в пределах этих двух скоростей, движение совершается для отдельных элементарных струек частью с вихрями и частью без вихрей в зависимости от удаления этих струек от стенок канала.

б) Нижняя критическая скорость зависит от размеров канала (приблизительно обратно пропорциональна гидравлическому радиусу), от физико-химических свойств газа и его температуры и совершенно не зависит от степени шероховатости стенок канала.

в) Предельная безвихревая скорость зависит от физико-химических свойств газа, его температуры и размеров канала (приблизительно обратно пропорциональна корню квадратному из гидравлического радиуса), так и в значительной мере от степени шероховатости стенок канала.

г) Для некоторых газов при известной температуре, размерах или степени шероховатости стенок величины нижней критической скорости и предельной безвихревой могут получиться близкими к практически возможным в металлургических печах.

д) Для расчетов при скоростях ниже нижней критической следует принять формулы безвихревого движения, при скоростях выше предельной — формулы вихревого движения; при скоростях промежуточных необходимо брать некоторые средние значения из обеих категорий формул и при том тем ближе к каждой из них, чем ближе к пределам самые скорости.

Возвращаясь к выводу формулы для равномерного движения газа по наклонному потолку, оказывается после указанного необходимым рассмотреть оба случая движения вихревого и безвихревого.

Для вихревого движения, более полно разработанного в гидравлике как с теоретической, так и с экспериментальной стороны, является наиболее удобным принять для потери напора на трение в канале весьма распространенный вид формулы, согласно которому эта потеря выражается членом, пропорциональным квадрату средней скорости v , расстоянию между взятыми сечениями l и обратно пропорциональным первой степени гидравлического радиуса R ; в связи с равенством (е) (стр. 89) после сокращения на l обеих частей равенства это дает:

$$k \frac{v^2}{R} = \left(\frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} \right) \sin i_0 = (\lambda - 1) \sin i_0 \dots (15)$$

где k есть коэффициент, находимый опытом.

Для установления численного значения этого коэффициента возможно воспользоваться данными Biel'я, статья которого уже цитирована выше и который, на основании весьма обстоятельных исследований и разбора существующих опытов, нашел возможным предложить формулу для k , объединяющую все жидкости как капельные, так и газообразные, для чего коэффициент k он предполагает функцией от выражения $\frac{\eta}{\gamma}$, значение которого выяснено уже выше. По Biel'ю возможно принять:

$$k = 0,001 \left[a + \frac{f}{\sqrt{R}} + \frac{b}{v\sqrt{R}} \cdot \frac{\eta}{\gamma} \right] \dots (16)$$

Здесь a есть некоторый постоянный коэффициент, равный 0,12; η —абсолютная вязкость движущейся жидкости, выраженная в абсолютных единицах; γ —вес одного кубического сантиметра газа в граммах; таким образом, например, для воздуха при 1200° и обыкновенном давлении при η равном 0,000548 величина $\frac{\eta}{\gamma}$ будет иметь значение 2,36; затем величины f и b , одинаковые для всех жидкостей, зависят от степени шероховатости стенок и могут быть приняты следующими:

	b	f
а) для гладкого цемента с песком и очень гладкого бетона	0,46	0,036
б) для гладких камней и обыкновенного бетона	0,27	0,054
в) для обыкновенного камня	0,27	0,072
г) для необработанного камня; простой каменной кладки	< 0,27	> 0,072

Нетрудно видеть, что наиболее пригодным для печных каналов не особенно тщательной кладки следует считать случай «в». Принимая в дальнейшем эти значения коэффициентов и заменяя, кроме того, вес одного куб. сантиметра газа в граммах γ через вес одного куб. метра в килограммах Δ , при

чем $\gamma = 0,001 \Delta$, получим следующее выражение для 1000 k :

$$1000 k = 0,12 + \frac{0,072}{\sqrt{R}} + \frac{0,27 \cdot 0,548}{\Delta} \frac{1}{v\sqrt{R}} = \\ = 0,12 + \frac{1}{\sqrt{R}} \left[0,072 + \frac{0,148}{v\Delta} \right]$$

или с достаточною точностью:

$$1000 k = 0,12 \left[1 + \frac{0,6}{\sqrt{R}} \left(1 + \frac{1}{v\Delta} \right) \right] \dots (16')$$

Принимая во внимание, что вязкость η слабо меняется с температурою и что, следовательно, принятое в формуле для k значение ее пригодно с достаточною для практики точностью для всех температур, имеющих место в металлургических печах. и что, кроме того, как вязкость, так и удельный вес воздуха и продуктов горения высокой температуры близки между собою, возможно считать полученную формулу (16') пригодною для различного рода вычислений.

Здесь уместно осветить несколько значение величины R при движении газов в печи. В то время как при движении капельной жидкости для определения R берут лишь смоченный периметр, считая сопротивление на свободной поверхности ничтожно малым по сравнению с сопротивлением самого русла, в рассматриваемом нами случае движения газа, наоборот, будет более целесообразным и близким к истине брать полный периметр живого сечения, включая сюда, следовательно, и ширину канала по свободной поверхности; при этом, очевидно, принимаем, что неподвижная часть газа в печи, лежащая под движущейся струею, более холодная, а значит и более тяжелая (в 7—8 раз), представляет такое же сопротивление движению, как и стенка канала. Это допущение, очевидно, тем ближе будет к истине, чем менее будет увлекаться неподвижный объем движущимся потоком, т. е. чем он меньше и чем ближе прилегает к твердому поду печи, что, конечно, и должно иметь место при правильно рассчитанных и сконструированных печах.

Таким образом, для канала прямоугольного сечения шириною B при толщине движущейся струи e гидравлический радиус должен быть взят равным:

$$R = \frac{Be}{2(B+e)} = \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{1}{B} + \frac{1}{e}} = \frac{1}{2} \frac{e}{1 + \frac{e}{B}}$$

Для случая равномерного безвихревого движения возможно воспользоваться формулами, данными Пуазейлем и проверенными соответственными опытами как названного ученого, так и других для движения жидкостей капельных. Для жидкостей

газообразных исследований не имеется, тем не менее характер явления и полная аналогия между движениями жидкостей капельных и газообразных, особенно ясно подмеченная Билем в его цитированном уже выше сочинении, заставляют с весьма большою долею вероятности заключить, что формулы Пуазейля применимы вполне и для движения газов. К этому же приводят и теоретические выводы, дающие возможность прийти к формуле безвихревого движения тождественной по виду с формулою Пуазейля, исходя из уравнений движения Навье, применимых безразлично для жидкости капельной и газообразной. Формула Пуазейля имеет вид:

$$1000w = \frac{32lv}{9,81d^3} \cdot \frac{\eta}{\gamma} \dots (17)$$

где w есть потерянный напор в метрах, l — длина трубы в метрах, v — средняя скорость движения в м/сек, d — диаметр трубы в метрах, η и γ имеют те же значения, как и в формуле (16).

Для атмосферного воздуха температуры около 1200° , попрежнему, $\frac{\eta}{\gamma}$ может быть заменено выражением $\frac{0,548}{A}$; точно так же d для каналов не кругового сечения может быть заменено через $4R$, где R есть гидравлический радиус.

При этих обозначениях, сличая уравнение (e) (стр. 89) с уравнением (17), получим после сокращения на l :

$$\frac{0,032}{,81} \cdot \frac{0,548}{A} \cdot \frac{v}{16R^2} = \frac{A_i - A}{A} \sin i_0 = (\lambda - 1) \sin i_0$$

или с вполне достаточным приближением:

$$v = 9000 (A_i - A) R^2 \sin i_0 = 9000 A (\lambda - 1) R^2 \sin i_0 (18)$$

Формулы (18) и (15), последняя в совокупности с формулою (16) или (16') и, наконец, формулы (14) и (14') дают возможность решать различного рода задачи на равномерное движение в печи. Очевидно, что при этом, попрежнему, возможно в большинстве случаев практики металлургических печей, когда состав неподвижного и движущегося объема газа одинаков, пользоваться упрощенным выражением для $\lambda - 1 = \frac{A_i - A}{A}$, принимая $t_i = 0$,

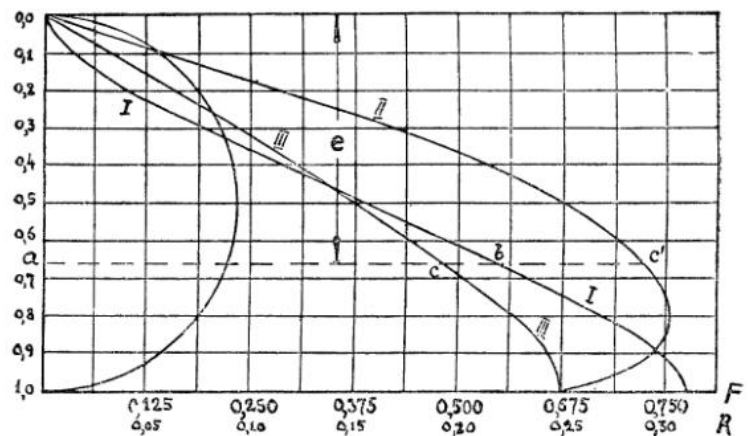
при чем $\lambda - 1 = \frac{t}{273}$.

Из задач на равномерное движение наиболее характерными являются две.

Первая задача. Даны поперечные размеры печи и уклон ее потолка. Определить тот объем продуктов горения, который необходим для того, чтобы при движении они могли заполнить все сечение печи, не оставляя места неподвижному холодному объему на поду и чтобы в то же время

давление на поду, соответствующему свободной поверхности канала, было равно наружному атмосферному во избежание прорыва печных газов наружу через рабочие отверстия печи. При подобной постановке задачи гидравлический радиус печи является заданным размерами печи и задача сводится к определенной скорости газов печи v по формуле (15) и (18). Приняв окончательно то из значений для скорости v , которое соответствует пределам, указанным формулами (14) и (14') и зная площадь поперечного сечения печи, нетрудно определить необходимый объем продуктов горения, а по ним и требующийся объем горючего.

Вторая задача. Дан объем горючего и соответственный объем продуктов горения, протекающий в одну секунду. При заданной ширине печи прямоугольного сечения и уклоне потолка требуется определить положение свободной поверхности газового потолка и по ней задать соответственно положение пода печи. Задача эта, являясь по суще-



Фиг. 8. I — кривая для F ; II — кривая для R ; III — кривая для R при полном периметре.

ству вполне определенной, тем не менее приводит к решению довольно сложного уравнения. В виду этого рекомендуется решать ее попытками, аналогично с приемами, употребляемыми в практике расчета водяных каналов. Ход решения может быть при этом нижеследующий. По объему газов Q , задаваясь определенной скоростью v , определяют соответствующую площадь живого сечения F' и по ней, зная ширину печи, определяют глубину потока e и гидравлический радиус R . Затем, выбирая формулу (15) или (17), в зависимости от величины заданной скорости v и формул (14) и (14'), вставляют в них найденные значения R ; правильно заданная скорость v должна этим уравнениям удовлетворять.

При решении задач второго типа приходится иной раз иметь дело с печами непрямоугольного сечения. Очевидно в этом случае для определения R необходимо иметь закон изменения ширины печи

по свободной поверхности вместе с высотой газового потока. Здесь еще более уместен способ решения попытками. Укажем, для примера, способ нахождения положения свободной поверхности для печи круглого сечения диаметра D (подобные печи встречаются в некоторых производствах). В этом случае весьма удобно пользоваться заранее составленной диаграммой, дающей величину площади живого сечения и гидравлического радиуса в зависимости от толщины e движущегося потока. На фиг. 8 изображена половина сечения круглой печи и рядом даны кривые площади и гидр. радиуса для диаметра печи равного единице. Гидравлический радиус вычислен в двух предположениях: а) что для его вычисления необходимо принимать во внимание весь периметр живого сечения, включая и горизонтальную линию свободной поверхности, и б) что линия свободной поверхности исключается.

Задаваясь наперед какой-либо высотой e для данного секундного объема газа, находят по диаграмме соответствующую этой высоте площадь живого сечения F умножением абсциссы ab на D^2 и соответствующий гидравлический радиус R умножением абсциссы ac (или ac') на D . По площади нетрудно определить скорость и, вставив затем ее в формулу (15) или (17), смотря по ее величине, проверить, насколько она удовлетворяет этим равенствам.

Неравномерное движение.

Случай равномерного движения в печи осуществляется в полной мере сравнительно весьма редко, так как необходимо иметь сравнительно весьма большую длину, чтобы успела установиться надлежащая скорость равномерного движения и успели сгладиться все те обстоятельства, которые сопровождают вход газов в печь. Точно также весьма часто в конце печи имеются пороги и другие преграды, которые не дают возможности образоваться равномерному движению на всем протяжении печи.

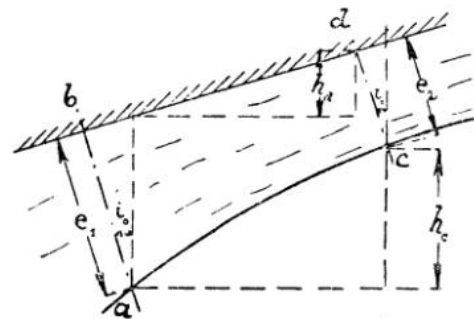
Для исследования неравномерного движения в его общем виде, рассмотрим печь с восстающим сводом, наклоненным к горизонту под углом i_0 (фиг. 9), по которому газ движется ускоренно, так как вследствие сравнительно небольшой длины свода движение еще не могло сделаться равномерным; начальная скорость и секунднй объем газа, а, следовательно, и толщина газовой струи в начальном сечении канала, заданы условиями входа. Неравномерность движения будет иметь, очевидно, следствием, что уклон свободной поверхности i_0 будет величиною переменною, как, равным образом, и глубина потока e . Определение зависимости i_0 или e от заданных условий и является ближайшею целью задачи о неравномерном движении.

Нетрудно показать, что аналогично с движением равномерным величина напора, теряемая на приращение скорости и на сопротивления, будет одинаковою для всех элементарных струек.

Возьмем два сечения рассматриваемой струи ab и cd и примем, что движение в обоих сечениях происходит струйками между собою близко параллельными, благодаря чему давления в сечениях распределяются по законам гидростатики. Напишем уравнение Бернулли для струйки ac и bd . Называя величину напора, теряемого на сопротивления соответственно w_{ac} и w_{bd} , имеем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_a}{\Delta} + \frac{v_a^2}{2g} &= \frac{p_c}{\Delta} + \frac{v_c^2}{2g} + h_c + w_{ac} \\ \frac{p_b}{\Delta} + \frac{v_b^2}{2g} &= \frac{p_d}{\Delta} + \frac{v_d^2}{2g} + h_d + w_{bd} \end{aligned} \right\} \dots (a)$$

Здесь значки у p и v соответствуют точкам, к которым они относятся, значение h_c и h_d видно из чертежа.



Фиг. 9.

На основании рассуждений, примененных уже выше, возможно, очевидно, написать ряд следующих равенств:

$$\left. \begin{aligned} p_a &= p_i \\ p_c &= p_i - \Delta_i h_c \\ p_b &= p_i - \Delta e_1 \cos i_0 \\ p_d &= p_c - \Delta e_2 \cos i_0 = p_i - \Delta_i h_c - \Delta e_2 \cos i_0 \end{aligned} \right\} \dots (b)$$

Кроме того, из чертежа усматривается, что

$$\begin{aligned} h_c &= e_1 \cos i_0 + h_d - e_2 \cos i_0 = \dots (c) \\ &= l \sin i_0 + (e_1 - e_2) \cos i_0 \end{aligned}$$

При этих равенствах из уравнений (a) имеем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{v_c^2}{2g} - \frac{v_a^2}{2g} + w_{ac} &= \frac{\Delta_i h_c}{\Delta} - h_c = h_c \left(\frac{\Delta_i}{\Delta} - 1 \right) = \\ &= \left[l \sin i_0 + (e_1 - e_2) \cos i_0 \right] \left(\frac{\Delta_i}{\Delta} - 1 \right) \\ \frac{v_d^2}{2g} - \frac{v_b^2}{2g} + w_{bd} &= \frac{-\cos i_0 (e_1 - e_2) + \Delta_i h_c}{\Delta} - h_d = \\ &= \left[l \sin i_0 + (e_1 - e_2) \cos i_0 \right] \left(\frac{\Delta_i}{\Delta} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \dots (d)$$

Имея в виду, с одной стороны, полученные зависимости, одинаковые для всех элементарных струек и, с другой стороны, замечая, что сопро-

тивления w_{ac} и w_{bd} должны рассматриваться, как функции скоростных напоров, необходимо прийти к заключению, что уравнение Бернулли может быть аналогично написано и для средней скорости течения полной струи; называя средние скорости в сечениях ab и cd соответственно через v_1 и v_2 и полное сопротивление на пути от сечения ab до сечения cd через w , мы будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} + w = \\ = \left[l \sin i_0 + (e_1 - e_2) \cos i_0 \right] \left[\frac{\Delta_i}{\Delta} - 1 \right] = \\ = \left[l \sin i_0 + (e_1 - e_2) \cos i_0 \right] (\lambda - 1) \end{aligned} \right\} \dots (19)$$

Выражение w зависит от переменной скорости; поэтому уравнение удобно представить в дифференциальном виде, взяв расстояние l между сечениями ab и cd бесконечно малым dx ; при этом член w может быть взят в том виде, какой ему придан уравнениями (15) и (17) для равномерного движения в зависимости от того, будет ли скорость v больше или меньше предельной критической.

Соответственно с этим, уравнение (19) превратится в одно из следующих двух:

$$\left. \begin{aligned} (\lambda - 1)(\sin i_0 dx - \cos i_0 de) = \frac{v dv}{g} + \frac{kv^2}{R} dx \\ (\lambda - 1)(\sin i_0 dx - \cos i_0 de) = \frac{v dv}{g} + k_1 \frac{v}{\Delta R^2} dx \end{aligned} \right\} \dots (20)$$

Знак минус перед de необходимо поставить в виду того, что при увеличении x , e согласно чертежу уменьшается.

Из этого уравнения представляется возможным исключить v при помощи уравнения расхода

$$Q = Fv = \text{Const} \dots (21)$$

где F , очевидно, может быть выражен при заданных размерах печи через e и x . При этом в результате получается дифференциальное уравнение, дающее зависимость толщины газовой струи от x при заданной степени шероховатости печи; это уравнение является, следовательно, уравнением свободной поверхности струи в прямоугольной координатной системе (x, e).

Интегрирование этого уравнения, не представляя математических трудностей, особенно для случая постоянной ширины печи B , когда $F = Be$, приводит все же к довольно сложным выражениям, неудобным для практических приложений. Тем не менее и дифференциальный вид уравнения может указать на возможность существования прыжка в газовой струе, подобно тому, как это имеет место в струе капельной жидкости. В самом деле, из уравнения (21) в применении к каналу прямо-

угольной формы, после дифференцирования и умножения на $\frac{v}{e}$ имеем:

$$v dv + \frac{v^2}{e} de = 0.$$

После подстановки найденного таким образом значения $v dv$ в уравнении (20) и некоторых простых преобразований, получим соответственно для вихревого и безвихревого движения:

$$\frac{de}{dx} = \frac{(\lambda - 1) \sin i_0 - \frac{kv^2}{R}}{(\lambda - 1) \cos i_0 - \frac{v^2}{e}} = \text{tg} i_0 \frac{\lambda - 1 - \frac{kv^2}{R \sin i_0}}{\lambda - 1 - \frac{v^2}{e \cos i_0}}$$

и

$$\frac{de}{dx} = \frac{(\lambda - 1) \sin i_0 - \frac{k_1 v}{\Delta R^2}}{(\lambda - 1) \cos i_0 - \frac{v^2}{e}} = \text{tg} i_0 \frac{\lambda - 1 - \frac{k_1 v}{\Delta R^2 \sin i_0}}{\lambda - 1 - \frac{v^2}{e \cos i_0}}$$

Замечая, что R есть также функция e , что v весьма легко исключается из полученных зависимостей при помощи уравнения (21), мы из вида этих уравнений можем заключить, что величина $\frac{de}{dx}$, то-есть тангенс угла, составляемого касательной к свободной поверхности с осью x , может быть равен, больше или меньше $\text{tg} i_0$ в зависимости от того, в каком соотношении между собою находятся величины $\frac{1}{e \cos i_0}$ и $\frac{k}{R \sin i_0}$ (соотв. $\frac{k_1}{\Delta R^2 \sin i_0}$) или же величины $\text{tg} i_0$ и $\frac{ke}{R}$ (соотв. $\frac{k_1 e}{\Delta R^2}$). Это обстоятельство доказывает, что, аналогично с движением капельной жидкости в открытом канале, при соблюдении некоторых условий, касающихся уклона потолка, степени шероховатости стенок, поперечных размеров печи (а следовательно и скорости), возможно образование прыжка.

Эта возможность сохраняется, очевидно, и при обратном уклоне потолка (понуrom своде), и при отсутствии уклона, т.-е. горизонтальном своде.

Нам кажется, что подобное обстоятельство может на практике повести к неожиданным результатам и объяснить плохое действие и отсутствие достаточного обогрева некоторого пространства печи, сконструированной на первый взгляд во всех отношениях вполне удовлетворительно. К сожалению, сложность выражения для $\frac{de}{dx}$ делает бесполезным в практическом отношении вывод каких-либо общих зависимостей, пригодных для проверки печных конструкций при всевозможных условиях. Задача может быть удобно доведена до конца лишь в каждом частном случае при известных размерах печи и, особенно, при заданном расположении входных отверстий относительно потолка ее. Здесь мы

читаем достаточным ограничиться только лишь указанием на возможность подобного рода явлений в печи.

На практике, в большинстве случаев, достаточно лишь знать толщину газовой струи, движущейся по потолку, в начале и конце свода с тем, чтобы руководиться этим при общем расположении пода печи; как то указывалось неоднократно выше, последний для возможности его непосредственного обогрева горячими газами не должен помещаться ниже свободной поверхности газового потока.

В этом случае следует интегрировать уравнение (20) по всей длине печи, или, еще проще, воспользоваться непосредственно уравнением (19), заменив лишь в нем l через L , длину всей печи, и w через w_L — сопротивление на всей длине печи.

Предполагая непрерывное изменение живого сечения и скорости при движении и параллельность струй в каждом сечении, возможно, очевидно, для w_L написать следующие выражения, соответственно для вихревого и безвихревого движения:

$$w = \int_0^L \frac{kv^2}{R} dx$$

$$w_L = \int_0^L \frac{k_1 v}{\Delta R^2} dx$$

Так как обычно размер печи, а следовательно, и скорости будут отличаться между собою незначительно в начале и конце печи, то написанные интегралы могут быть с достаточной для практики точностью заменены их средними значениями, вычисленными по средним значениям подинтегральной функции; при этом:

$$\left. \begin{aligned} w_L &= L \left(\frac{kv^2}{R} \right)_{cp} \\ w_L &= kL \left(\frac{v}{R^2} \right)_{cp} \end{aligned} \right\} \dots \dots (22)$$

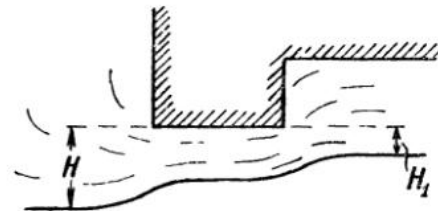
при чем средние величины могут быть найдены или как средние арифметические между их крайними значениями, или, точнее, могут быть вычислены по средней арифметической скорости из соответствующих формул. Применяя этот последний способ для случая прямоугольного сечения постоянной ширины B , когда F зависит от одной переменной e , заменяя скорость v через Q из формулы (21), окончательно получим соответственно для вихревого и безвихревого движения:

$$\left. \begin{aligned} &(\lambda - 1) [L \sin i_0 + (e_1 - e_2) \cos i_0] = \\ &= \frac{Q^2}{B^2} \left[\left(\frac{1}{e_2^2} - \frac{1}{e_1^2} \right) + \frac{k_1 L}{4R_{cp}} \left(\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} \right)^2 \right] \\ &(\lambda - 1) [L \sin i_0 + (e_1 - e_2) \cos i_0] = \\ &= \frac{Q^2}{2gB^2} \left(\frac{1}{e_2^2} - \frac{1}{e_1^2} \right) + k_1 \frac{LQ}{2R_{cp}^2 B} \left(\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} \right) \end{aligned} \right\} \dots (23)$$

Эти уравнения, заключая две переменные величины, могут послужить для определения одной из них по заданной другой, при чем решение уравнения, попрежнему, наиболее удобно вести методом постепенного приближения. Если бы канал был большой длины и показалось бы желательным произвести вычисления более точным образом, то его возможно было бы разбить по длине на участки определенной длины и для каждого из них последовательно вычислить одну из величин e по заданной другой. При этом, очевидно, весьма удобно и возможно было бы принять во внимание и падение температуры, так как не представлялось бы затруднительным принять ее неодинаковою для различных участков.

Уравнение (23) применимо одинаково, как для i_0 положительного, так и отрицательного, то-есть как для восходящего, так и для нисходящего свода

Равным образом оно позволяет решать вопросы и о движении газовой струи, подпертой в конце канала, данного уклона порогом некоторой высоты. При этом высота струи, переливающейся через порог, должна быть определена по формулам, данным на стр. 87.



Фиг. 0.

С задачей о неравномерном движении тесно соприкасается также и вопрос о движении жидкости по несовершенному водосливу, т.-е. такому случаю движения через порог, при котором струя его покидающая движется не свободным движением, а является подпертой и тем самым влияет на расход на водосливе.

Этот случай неравномерного движения, при котором поверхность дна потока не только не представляется прямою линиею, но даже не является и плавною кривою, считается одним из наиболее сложных даже в гидравлике капельной жидкости и до сих пор не во всех подробностях исследован теоретически: тем более возможно ожидать усложнений при рассматриваемом нами движении.

Нам кажется, что здесь вполне уместно было бы ограничиться формулою вида, данного Дюбуа:

$$Q = \mu B \cdot \left(H + \frac{H_1}{2} \right) \sqrt{2g(H - H_1)}$$

где μ — практический коэффициент, равный в зависимости от меньшей или большей ширины порога от 0,40 до 0,42; B — длина ребра водослива, счи-

тремя в направлении перпендикулярном к движению; H и H_1 — высота соответственно верхнего и нижнего уровней над порогом водослива (фиг. 10). Эта формула выведена в предположении, что объем жидкости, движущейся через водослив выше нижнего уровня, может быть найден по формуле совершенного водослива, а остальной объем жидкости по формуле истечения через заполненное отверстие; полный объем находится сложением этих двух объемов, что и выражено формулой Дюбуа. Имея это в виду, не трудно применить эту последнюю для движения газа, воспользовавшись для этого всеми теми рассуждениями, которые были приведены выше в соответствующих главах.

При этом формула в случае газа должна принять нижеследующий вид:

$$Q = \mu B \cdot \left(H + \frac{H_1}{2} \right) \sqrt{2g(H - H_1)} \sqrt{(\lambda - 1)}. \quad (24)$$

Комбинации простых случаев движения.

В настоящей главе, в виде иллюстрации применения выведенных выше формул, будут даны схемы решения некоторых случаев движения газов, которые могут иметь применение на практике. При этом, для простоты, нами повсюду будет предполагаться лишь одно вихревое движение.

1) Дымовая труба. Обычно наблюдаемый на практике случай движения газов в вертикальной дымовой трубе является движением по сплошь заполненной трубе, а потому выведенные выше формулы свободного движения не могут быть непосредственно к нему применены. Тем не менее, как видно из дальнейшего, при некоторых условиях обстоятельства движения могут изменяться в пользу их применения.

Предположим, что непосредственно перед вступлением в дымовую трубу, высотой h и постоянного поперечного сечения F , газ имеет некоторую скорость v_1 , которая в трубе переходит в скорость v , удовлетворяя уравнению расхода

$$Q = Fv = F_1v_1$$

Уравнение Бернулли, написанное для сечения первого, непосредственного предшествующего входу в трубу, и для сечения второго, выходного, лежащего на высоте h над первым, примет при прежних обозначениях следующий вид:

$$\frac{p_1}{\lambda} + \frac{v_1^2}{2g} = h + \frac{p_2}{\lambda} + \frac{v^2}{2g} + \frac{khv^2}{R}$$

Давление p_1 внизу трубы определяется по условиям движения, предшествующим дымовой трубе (см., напр., следующий пример). Имея в виду наиболее полно оттенить характер явления, предположим наиболее простой случай, что давление p_1 равно

давлению наружного воздуха p_i на том же уровне (например, вследствие наличия рабочего отверстия в печи)

$$p_1 = p_i$$

Давление p_2 при выходе наружу должно равняться давлению наружного воздуха на той же высоте:

$$p_2 = p_1 - \Delta_i h.$$

Таким образом имеем:

$$\frac{v^2}{2g} - \left(\frac{F}{F_1} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} + \frac{kLv^2}{R} = -h + \frac{\Delta_i}{\lambda} h = h(\lambda - 1) \quad (25)$$

Полученное уравнение включает одно неизвестное v , которое и может быть из него определено.

Особенно простой вид получит выражение для v в том случае, если $F = F_1$, т.е. $v = v_1$, тогда, очевидно, весь свободный напор в дымовой трубе, величина которого определяется второю частью уравнения (25), идет только на преодоление трения в трубе; при этом, имея в виду, что $h = L$,

$$v = \sqrt{\frac{1}{k}} \sqrt{R} \sqrt{\lambda - 1} \dots \dots (26)$$

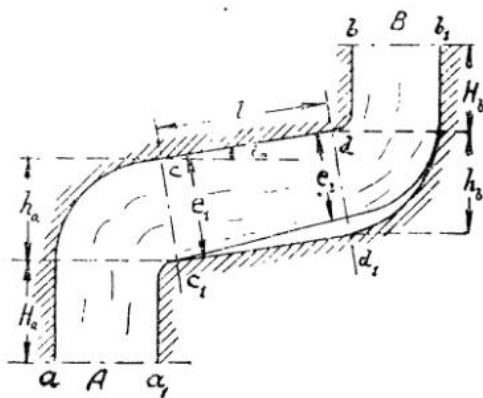
Заслуживает полного внимания тот факт, что то же выражение может быть получено из уравнения (15), если в последнем уклон канала i считать равным 90° . Это доказывает, что случай дымовой трубы является предельным для движения в канале, при котором все же формулы этого последнего движения не теряют своего значения.

Уравнение (26), равно как и (25), удовлетворяется, очевидно, для данного поперечного размера труб, а, значит, и данного R только при вполне определенном объеме протекающего газа, а следовательно, при вполне определенной температуре, как его самого, так и окружающего воздуха, которая устанавливает значения Q , k и λ .

Таким образом труба, работающая удовлетворительно при некоторой температуре, при изменении ее или не будет в состоянии пропустить данного количества газов при давлении атмосферном («печь дымит») в полости печи, или же не будет сплошь заполнена. Отсюда следует также заключить, что предвидя постепенное охлаждение газов в дымовой трубе, будет ошибочным проектировать ее повсюду одинакового сечения без сужения сверху. Если вследствие изменившихся условий труба не будет сплошь заполнена газом, то в ней возможно или беспорядочное движение последнего, отдельными, между собою несвязанными струйками с неподвижными промежутками, или же, что более вероятно и естественно, газ будет двигаться сплошной струей, прикасающейся к одной из стенок трубы в зависимости от какой-либо случайной несимметричности в трубе (напр., ветер с одной сто-

роны, более сильное охлаждение и т. п.). Подобный поток делается еще более определенным, если, как то обычно и бывает, дымовая труба кверху суживается, т.-е. ее стенки несколько наклонны кверху и угол i_0 не равен 90° , а несколько меньше. Тогда в полной мере является применимой формула (15) и положение свободной поверхности потока определяется вполне.

Положение свободной поверхности в трубе определяет также и величину неподвижного объема более холодного газа. С весьма большою долей вероятности возможно предположить, что этот объем не будет совершенно неподвижным, а, напротив, будет иметь медленное движение книзу, постепенно нагреваясь и смешиваясь с горячим потоком. Некоторые опыты над дымовыми трубами домовых печей указывают на полную возможность такого движения вниз и проникновения в печную полость холодного воздуха, например, при работе неболь-



Фиг. 11.

шого количества из большой серии печей, дымоходы которых соединены в одну общую дымовую трубу.

В виду изложенных обстоятельств проверка действия дымовой трубы при различных вероятных условиях ее работы при помощи формул свободного течения может представить интерес и оказать пользу в определении размеров как ее самой, так и тех регулирующих приспособлений, которые должны быть на ней поставлены для восстановления всякий раз ее правильного действия.

2) Дымовая труба, печь и топочная камера. Имеется свод длиной l (фиг. 11) с уклоном i_0 , в которой газ в заданном секундном количестве Q , при известной температуре, поступает из вертикальной печной полости A высотой H_a ; из печи газ уходит в вертикальную трубу высотой H_b . Рассматриваемая система каналов окружена наружным воздухом одинаковой повсюду температуры; для удобства обслуживания печи и возможно полного устранения выбивания пламени через рабочие отверстия, расположенные вдоль пода, давление

в них по возможности не должно быть больше давления наружного воздуха; с другой стороны невозможно также допустить засасывания в печь через рабочие отверстия холодного наружного воздуха. Совокупность этих двух требований приводит к необходимости в нижней точке рабочего отверстия, т.-е. точке наименьшего давления держать его равным давлению наружного воздуха. Однако, при расчете печи будет более удобным и наглядным предположить, что на поду печи имеется слой неподвижного холодного газа и воздуха некоторой конечной толщины. Определив затем толщину газовой струи и положение ее нижней свободной поверхности, возможно под печи $e_1 d_1$ расположить от нее сколь угодно близко, уменьшив до нуля пространство неподвижного газа.

Истечение в начальном сечении свода cc_1 является истечением под уровнем, рассмотренным выше.

Если обозначить давление наружного воздуха в aa_1 (где предполагается в печи топочное отверстие и где скорость газа еще равна нулю) через p_i , то при обозначениях чертежа, очевидно, возможно написать следующее уравнение:

$$(\lambda - 1)H_a = \frac{v_c^2}{2g} + \frac{k_a l_a v_a^2}{R_a} + \zeta_c \frac{v_c^2}{2g}$$

Здесь v_c — скорость в сечении cc_1 , v_a — скорость в вертикальном (призматическом) канале A , R_a его гидравлический радиус, l_a длина, k_a соответствующий коэффициент трения, $\zeta_c \frac{v_c^2}{2g}$ выражает собою высоту, теряемую на местные гидравлические сопротивления в закруглении и др. Предполагая для простоты в нашем частном случае, что $l_a = H_a$; $v_a = v_c$ (т.-е. $F_a = F_c$) возможно, очевидно, на основании составленного выше выражения написать:

$$Q = F_a \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{2g} + \frac{k_a H_a}{R_a} + \zeta_c} \cdot \sqrt{(\lambda - 1)H_a}} \quad (a)$$

Коэффициент ζ_c может быть определен по данным и формулам, существующим для воды, так как имеющиеся наблюдения указывают на допустимость подобного рода приема. Уравнение (a) дает возможность при заданных H_a и Q определить попытками поперечные размеры канала A и, вместе с тем, и толщину газовой струи e_1 при входе на наклонный свод.

Для дальнейшего движения газов по своду необходимо применить уравнения неравномерного движения, данные в предшествующей главе. Если ограничиться временно лишь определением толщины струи e_2 в конечном сечении свода dd_1 , то возможно непосредственно применить уравнение (23), которое решается попытками.

При известной толщине e_2 становится также известной и соответствующая ей скорость v_2 , с которою газ покидает свод и вступает в вертикальную трубу B . Совершенно аналогично с уравнением, написанным выше для канала A , принимая, что в точке d_1 и на верхнем уровне трубы $b-b_1$ внутреннее давление равно наружному, возможно, очевидно, написать при обозначениях фиг. 11:

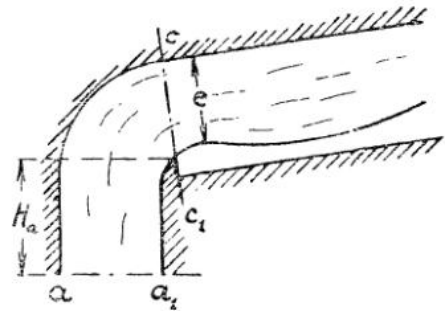
$$(\lambda - 1)(H_b + h_b) = \frac{h_b l_b v_b^2}{R_b} - \frac{v_2^2}{2g} + \zeta_b \frac{v_b^2}{2g} + \frac{r_b^2}{2g} \cdot (b)$$

здесь значками b обозначены все величины, относящиеся к трубе B .

Уравнение (b), решаемое попытками, дает возможность определить необходимую длину l_b и соответствующих высот $H_b + h_b$ трубы при заданных поперечных ее размерах, т.-е. R_b и v_b .

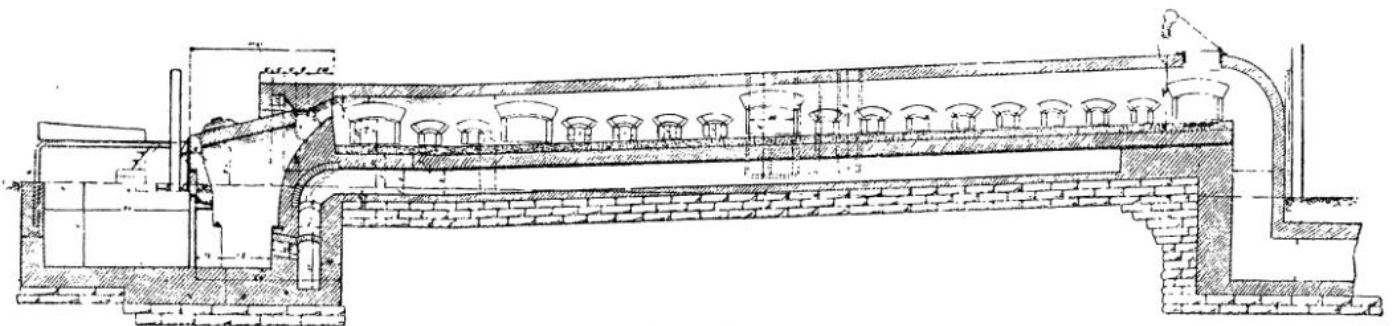
Нетрудно видеть, что задавая $v_b = v_2$, делая закругление внизу трубы настолько плавным, чтоб ζ_b возможно было считать равным нулю, и предполагая, наконец, что $H_b + h_b = l_b$, мы делаем движение в трубе независимым от ее высоты, что доказывает, что в этом случае для удаления печных газов не требуется особой тяги в трубе. Очевидно, этот несколько парадоксальный вывод необходимо объяснить тем, что скорость $v_b = v_2$, требующаяся для удаления газов, уже образовалась в самой печной полости. Во всех остальных случаях из совокупности всех написанных уравнений усматривается, что степень шероховатости стенок, уклон свода i_0 , его поперечные размеры не являются величинами произвольными, но связаны вполне определенным образом с размерами обеих вертикальных труб, подводящей и отводящей горячие газы и, кроме

при некоторых соотношениях вертикального канала A и размеров и уклона свода скорость входа на свод в сечении ee_1 будет настолько велика, что окажется больше скорости равномерного движения по своду и, следовательно, не только не будет увеличиваться при движении по своду, а, наоборот, станет уменьшаться и газовая струя начнет утолщаться (фиг. 12). При этом явлении весьма легко может получиться, вместо плавного утолщения струи—внезапное, то-есть так называемый прыжок—более или менее удаленный от входного сечения ee_1 и сопровождающийся, подобно



Фиг. 12.

прыжку водяному, энергичным вихревым движением на свободной поверхности. Образование прыжка, очевидно, более возможно при расположении узкого, т.-е. соответствующего большей скорости, входного сечения не у пода, а у свода печи, как то, например, имеет место в конструкции печи Путиловского завода, изображенной в качестве одного из примеров в статье проф. В. Е. Грум-Гржимайло «Гидравлический метод расчета пламенных печей» ¹⁾ (см. фиг. 13).



Фиг. 13.

того также и с температурою и объемным весом движущегося газа.

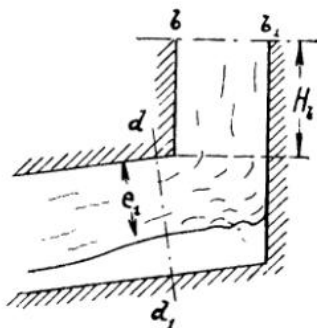
При желании найти точную кривую нижней свободной поверхности газового потока, кроме двух ее крайних точек, определяемых толщиной струи e_1 и e_2 в начале и конце свода, необходимо прибегнуть к решению уравнения неравномерного движения по своду для последовательных его сечений, что весьма удобно может быть достигнуто попытками. При этом полезно обратить внимание, что

Явление прыжка, особенно сравнительно удаленного от выходного отверстия (что возможно проверить, решая уравнение неравномерного движения предыдущей главы), может оказать весьма неблагоприятное влияние на степень обогрева пода под отверстием до места образования прыжка. Очевидно, предметы, помещенные в это пространство на поду печи, будут слабо нагреваться, а так как

¹⁾ Журнал Р. Мет. Общ. 1911 г., 1 ч., 199.

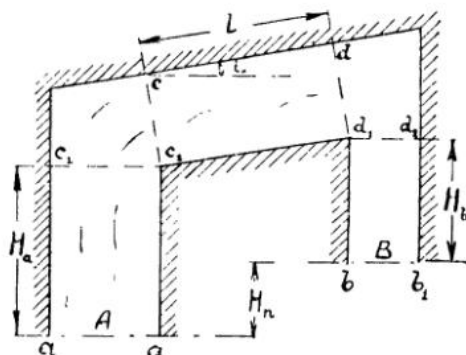
на этом входном участке печи, кроме того, весьма вероятно еще окончание реакции горения, незаконченной в топочной полости, то становится возможным осаждение копоти на холодных плохо прогреваемых предметах.

Несомненно, что движение газа в каналах, не снабженных плавными переходами, будет отличаться от описанного выше появлением значительных сопротивлений в закруглениях. В особенности значительны могут быть сопротивления за сечением dd_1 , если за ним не будет плавного перехода, как например, изображено на фиг. 14. В этом случае,



Фиг. 14.

очевидно, газ, движущийся в сечении dd_1 , не направится непосредственно в трубу, а, стремясь сохранить приобретенную скорость, будет двигаться до вертикальной стенки и лишь затем направится вверх, при чем вероятно вся энергия, соответствующая прежней скорости, будет потеряна на вихревые движения, благодаря чему необходимо предвидеть соответствующий напор на образование скорости в нижнем сечении трубы в вертикальном направлении.



Фиг. 15.

3) Топочная камера, печь и нисходящий отводной канал.

Газ в секундном объеме Q поднимается по вертикальной трубе A (фиг. 15) на высоту H_a до сечения $c_1 c_2$, затем переходит в канал с уклоном i_0 и длиной L и уходит по вертикальной направленной вниз трубе B , высотой H_b .

В этом примере мы встречаемся с движением газа по вертикальной трубе вниз. Необходимое

для этого давление в вертикальном сечении $d-d_1$ в канале L на высоте H_b над выходным течением $b-b_1$ трубы B может быть найдено из соответственным образом написанного уравнения Бернулли.

Аналогично с предыдущим, очевидно, получим для двух сечений $d-d_1$ и $b-b_1$:

$$\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_d}{\Delta} + H_b = \frac{v_b^2}{2g} + \frac{p_b}{\Delta} + \frac{k_b H_b}{R_b} \cdot \frac{v_b^2}{2g} + \zeta_b \frac{v_b^2}{2g} \quad (c)$$

здесь v_2 и v_b соответственно скорости в конце канала в сечении $d-d_1$ и в трубе B , p_d —давление в точке d_1 и p_b —давление в сечении $b-b_1$; два последних члена уравнения соответствуют потерям на трение в трубе и в закруглении при переходе от сечения $d-d_1$ со скоростью v_2 к сечению $b-b_1$ со скоростью v_b .

В полученном уравнении (c) возможно выразить давление p_b на уровне $b-b_1$ через давление наружного воздуха p_i на уровне d_1-d , пользуясь тем, что при выходе из вертикального канала в атмосферу давление p_b внутри канала и снаружи должно быть одинаковым.

При этом, очевидно, имеем:

$$p_b = p_i + \Delta_i H_b \quad \dots \quad (d)$$

Подставляя эти значения в уравнение (c), получим

$$\frac{v_2^2}{\Delta} - \frac{p_i}{\Delta} = H_b (\lambda - 1) + \frac{k_b H_b}{R_b} \cdot \frac{v_b^2}{2g} + \frac{v_b^2}{2g} - \dots - \frac{v_2^2}{2g} + \zeta_b \frac{v_b^2}{2g} \quad \dots \quad (e)$$

замечая, что скорость v_b обыкновенно равна скорости v_2 и редко меньше ее, видим, что во второй части равенства имеется сумма положительных членов, из чего необходимо заключить, что давление внутри печи больше давления окружающего на той же высоте пространства и что, следовательно, движение в канале L уподобляется движению по сплошь заполненному трубопроводу, работающему под давлением. Для получения этого избытка давления необходимо прибегнуть или к постоянному уменьшению скорости в наклонном канале и переводу ее в давление, или же к поддержанию избытка давления по всей длине этого канала.

Первый способ увеличения давления за счет скорости, как это указывает обширная практика движения воды, не может быть признан надежным и не дает надежных, наперед учитываемых результатов вследствие стремления жидкости сохранить прежнюю большую скорость с переходом в винтовое и затем вихревое движение. Таким образом остается лишь второй способ.

Все же и при этом расположении печных каналов возможно представить себе случай, когда движение газов в канале L должно совершаться при существовании нижней свободной поверхности. Этот случай будет иметь место тогда, когда газы на этом канале имеют значительную температуру и затем быстро ее теряют при переходе в вертикальный канал (например, от прикосновения к холодным болванкам). Если свободную поверхность газовой струи сильно нагретой опустить ниже отверстия $d-d_1$ (фиг. 16), то можно достичь в точке d_1 требуемой уравнением (e) разности давлений $p_d - p_i$.

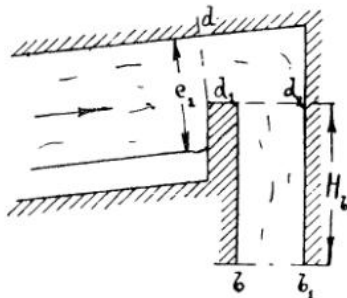
В самом деле, называя вертикальное расстояние свободной поверхности газа от точки d_1 через x и вес единицы объема сильно нагретого газа через Δ_a , получим, что давление p_a на уровне свободной поверхности, равное для движущейся и неподвижной части газа, будет удовлетворять уравнению.

$$p_d = p_a - \Delta_a x$$

$$p_i = p_a - \Delta_i x$$

откуда

$$\frac{p_d - p_i}{\Delta} = \frac{\Delta_i - \Delta_a}{\Delta} x = (\lambda - \epsilon) x \dots (f)$$



Фиг. 16.

Сопоставляя уравнение (e) и (f), возможно найти x , при чем очевидно, что оно может быть и меньше H_b , так как множитель при H_b , т. е. $(\lambda - 1)$ будет меньше множителя при x , где ϵ , равное $\frac{\Delta_a}{\Delta}$ будет меньше единицы.

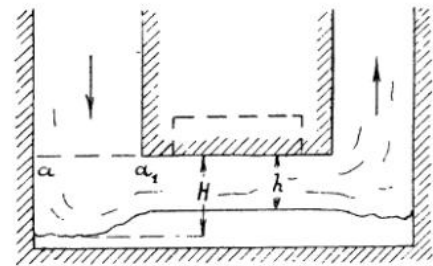
4) Порог в печи.

Газ в секундном количестве Q движется по вертикальной трубе вниз, затем по горизонтальному или слабо наклонному каналу и, наконец, выходит в вертикальную, направленную вверх трубу (фиг. 17).

Наиболее просто этот случай разрешается теоретически при соблюдении трех условий: а) что скорость опускания вниз газа ничтожно мала, б) что свод горизонтален, и с) что на выход газа в дымовую трубу и на преодоление сопротивлений при входе в нее от перемены направления требуется напор не больше того, который получается при свободном движении газовой струи по своду, т. е. без подпора со стороны дымовой трубы. При со-

блюдении этих условий получается случай вполне тождественный с описанным выше для движения жидкости по водосливу с широким порогом. Проверка соблюдения первых двух условий может быть сделана непосредственно, что же касается третьего условия, то проверка его возможна лишь после вычисления по формуле водослива (стр. 87) величины h — толщины газовой струи на своде. Зная ее, нетрудно вычислить из данной высоты дымовой трубы, достаточно ли ее сечение в связи с высотой h для пропуска газов. Если достаточно или если имеется запас высоты, то газ будет двигаться по дымовой трубе свободным движением, заполняя ее сплошь или не заполняя в зависимости от наличия избытка свободной высоты. В случае недостатка высоты газ будет подперт внизу у входа в дымовую трубу и этот подпор распространится на весь свод, обуславливая характер движения на нем, которое в этом случае будет происходить сообразно с формулами главы о равномерном движении газа. Действие дымовой трубы и применение к ней выведенных формул видно из разобранный выше случая 1.

Несколько сложнее представляется влияние скорости опускания газа в подводящем вертикальном



Фиг. 17.

канале, если эта скорость имеет заметную величину по сравнению со скоростью движения по своду. Эту скорость возможно определить, приняв во внимание, что движение вниз может происходить по сплошь заполненному каналу; таким образом для вычисления скорости имеются заданными Q и поперечные размеры вертикального канала. Влияние этой вертикальной скорости возможно охарактеризовать следующим образом.

Дойдя в вертикальном движении до сечения $a a_1$, газ начнет отчасти изменять направление, отчасти же по инерции, благодаря присущей ему скорости, будет продолжать движение до полного уничтожения последней, при чем естественно ожидать развития беспорядочного местного движения, которое поглотит значительную часть всего скоростного напора. Наиболее естественным будет считать, что половина напора будет потеряна и только лишь другая половина будет восстановлена в виде образования, некоторой высоты H_k струи при входе на свод печи.

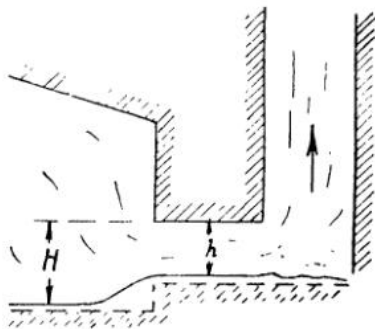
Для вычисления этой высоты, происходящей от скоростного напора, возможно воспользоваться выше данной формулой газового фонтана, положив в ней $\delta = 90^\circ$. При этом H_k получится равною

$$H_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_i}{t - t_i}.$$

Если, например, принять для v значение в 5 метров в секунду и положить $t_i = 0$ и $t = 1000^\circ$, то

$$H_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{5^2}{19,62} \cdot \frac{273}{1000} = 0,17 \text{ м.}$$

Так как толщину струи на своде обыкновенно надо считать не меньше 0,30 м., то напор H на водосливе, необходимый для образования такой толщины струи, должен быть не меньше $1,5 \times 0,30$, т.-е. 0,45 м. Это показывает, что высота H_k , образуемая уничтожением скорости в вертикальном направлении, покрывается с избытком естественной высотой H , образуемой перед водосливом, а потому при обычных размерах печей особого практического значения не имеет.



Фиг. 18.

Наконец, необходимо рассмотреть неточность, вносимую наклоном свода к горизонту. Практика водослива для воды, особенно опыты Базена и Рафтера показали, что наклон порога водослива начинает влиять на расход только при сравнительно значительном уклоне, превосходящем 1:5 и выше. При тех же условиях, которые встречаются на практике, обычно влиянием этого уклона возможно без заметной погрешности пренебречь.

В результате рассмотрения всех условий движения в данном случае как при точном выполнении требований главы об истечении через водослив, так и при отступлениях от нее, указывают, что при размерах печей, встречаемых на практике, обычно возможно пользоваться формулами водослива, рассматривая всю длину свода печи как широкий порог водослива и применяя, следовательно, формулу (11), для определения толщины газовой струи на своде.

Дальнейшим развитием задачи о водосливе является рассмотрение движения газа по своду, имею-

щему местное углубление, указанное на фиг. 17 пунктиром, что, в результате, превращает свод в камеру с двумя порогами, в начале и в конце. Очевидно, что если углубление будет иметь сравнительно небольшую длину, так что газовая струя будет «проскакивать» под ним, не нарушая покоя находящегося в углублении горячего газа, то сущность явления не изменится и формула (11) может попрежнему найти применение. Очевидно также, что возможная для этого длина углубления зависит в высокой степени от скорости движения газов. Каких-либо конкретных данных на этот предмет совершенно не имеется. При большой длине углубления, очевидно, задача сводится к определению обстоятельств движения по трем отдельным частям печи: по переднему порогу, представляющему неполный или полный водослив в зависимости от положения его нижней кромки на большей или меньшей высоте над кромкою заднего порога, по заднему порогу, представляющему полный водослив и, наконец, среднюю часть, представляющую собой канал с неравномерным, подпертым задним порогом движением (фиг. 18). Очевидно, что высота струи на заднем пороге определяется попрежнему по формуле (11). Высота струи H непосредственно перед порогом задается при этом из соотношения (8); она определит положение свободной поверхности перед порогом, которая при небольшой длине печи может быть принята без большой погрешности горизонтальною, независимо от формы свода самой печи.

Вполне определенное взаимное положение свободных поверхностей перед порогом и на пороге дает указание на то, что под самой печи и под ниже порога должны быть сделаны не на одной высоте, а как указано на фиг. 18 пунктиром, если не желают получить под порогом объема неподвижного, холодного газа.

5) Печь с двумя потоками газа, горячим и охлажденным.

На поду печи $o-o$ (фиг. 19) лежат болванки, подлежащие подогреву. Горячие газы, движущиеся по понурому своду печи, прикасаясь к холодным болванкам, значительно охлаждаются, при чем направляются вертикально вниз в нижнее отделение печи, где вновь приобретают горизонтальное направление и направляются в нижний вертикальный канал для дальнейшего отвода в дымовую трубу.

Весьма важным условием правильного действия подобной печи является то, чтобы на уровне пода $o-o$, там, где имеется ряд рабочих отверстий для передвижения болванок, давление внутри печи и снаружи было одинаково. При этом не будет как выбивания пламени из печи, так и засасывания наружного воздуха в печь.

При соблюдении этого условия печь делится горизонтальной линией $o-o$, на две части, которые возможно рассматривать вполне самостоятельно. В верхней имеется движение газов более нагретых из пространства топки с давлением, равным наружному, по своду печи до пода, тоже имеющего давление, равное наружному, а в нижней части движется газ охлажденный, из пространства точно так же с давлением равным наружному, через дымовую трубу в наружное пространство. Очевидно, что как в первой части так и во второй необходимо для осуществления движения расположить входное отверстие ниже выходного, т. е. топочное отверстие ниже уровня $o-o$ и этот последний, в свою очередь, ниже отверстия дымовой трубы.

Понурый свод верхней части почти обуславливается тем, чтобы получить уменьшение поперечных размеров последней по мере уменьшения количества движущегося по своду газа, по мере того, как он уходит вниз через промежутки между болванками. С другой стороны, понурый свод приводит к движению по сплошь заполненному каналу печи перед сечением $a-a$.

Так как давление в нижней точке этого сечения может быть принято равным наружному, то получается возможность, применив данные выше уравнения равномерного движения, дать зависимость между поперечными размерами сечений $a-a$ и другими размерами печи, как то, длиной свода и высотой топки.

Переходя к нижней части печи, мы видим, что здесь, по условиям конструкции, газ должен отсасываться книзу, а, следовательно, повсюду давление должно быть меньше наружного и, таким образом, движение не может иметь свободной поверхности, но должно совершаться по сплошь заполненным каналам.

Если задаться поперечными размерами каналов нижней части печи, то станет возможным определить высоту дымовой трубы, необходимую для получения движения газа в желаемом объеме.

В самом деле, называя давление наружное и вместе с тем и внутреннее на уровне $o-o$ через p_0 и в верхнем сечении дымовой трубы, лежащем на высоте H над уровнем $o-o$, через p_h мы имеем

$$p_h = p_0 - \Delta_i H$$

где Δ_i попрежнему вес единицы объема наружного воздуха.

Если скорость движения газов вниз между болванками, являющаяся в то же время начальной скоростью для нижней части печи в сечении $o-o$, обозначить через v_0 , а скорость в верхнем сечении дымовой трубы через v_h и, наконец, вес единицы объема газов нижней части печи, более холодных,

через Δ_a , то, очевидно, возможно на основании уравнения Бернулли написать:

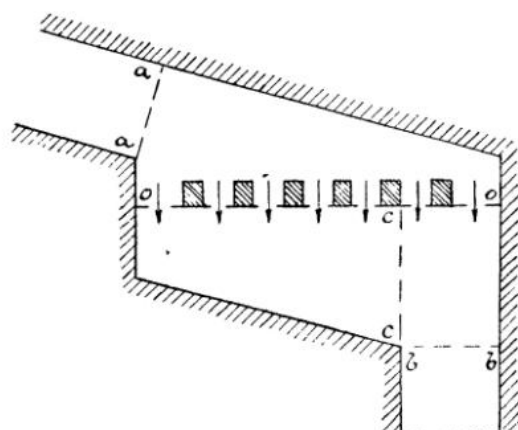
$$\frac{p_0}{\Delta_a} + \frac{v_0^2}{2g} = H + \frac{p_h}{\Delta_a} + \frac{v_h^2}{2g} + \xi$$

или, заменяя p_h через найденное для него значение,

$$\frac{v_0^2}{2g} = H - \frac{\Delta_i}{\Delta_a} \cdot H + \frac{v_h^2}{2g} + \xi$$

$$(\lambda_a - 1) H = \frac{v_h^2}{2g} + \xi - \frac{v_0^2}{2g}$$

Здесь под ξ понимают все сопротивления, которые необходимо преодолеть газовой струе при движении по каналам; из них сопротивление трения может быть вычислено по выше данным формулам, а сопротивления в коленах и закруглениях по формулам, существующим для воды; некоторого внимания заслуживают сопротивления, могущие появиться непосредственно при вступлении газа в рассматриваемую часть печи ниже уровня $o-o$.



Фиг. 19.

Вертикальная скорость вступления v_0 должна резко изменить свое направление на горизонтальное; затем снова горизонтальное направление изменяется резко на вертикальное. При этих изменениях скорость не имеет надлежащего направления стенками, в виду чего неизбежно образование местных вихревых движений, при чем обе скорости необходимо считать потерянными и включить их в вышеуказанную величину ξ . Для уменьшения этой последней, а вместе с тем также и высоты дымовой трубы и степени разрежения в каналах, нежелательной вследствие возможности засасывания через неплотности стенок наружного воздуха, следует по возможности уменьшить обе указанные скорости; особенно просто это достигается увеличением поперечных размеров горизонтального канала ниже уровня $o-o$. Это уменьшение скорости желательно также из соображений равномерности движения в нем. В самом деле, при заметной горизонтальной скорости очевидно, что

струйкам, движущимся вертикально ближе к правому на чертеже краю печи, не придется совершенно терять своей скорости для того, чтобы войти в отверстие $b-b$ отводящего канала, в то время, как крайним левым струйкам до входа в сечение $b-b$ придется переменить три раза скорость по направлению. В результате движение при этом установится с некоторым нарушением первоначальных предположений и равенство давлений на горизонтальной линии $o-o$ достигнуто не будет. Приняв, что при величине скорости в сечении $b-b$ равной v возможно пренебрегать скоростными напорами, в 10 раз меньшими напора $\frac{v^2}{2g}$, найдем, что для возможности этого необходимо сделать величину горизонтальной скорости движения перед $b-b$ примерно в 3 раза меньше скорости v , при чем площадь сечения $c-c$ должна быть в 3 раза больше площади $b-b$.

При желании найти распределение давления вдоль пути струи, начиная от уровня пода до сечения $b-b$, необходимо было бы при этих размерах каналов брать уравнения гидростатики; ниже сечения $b-b$ вплоть до верхнего сечения дымовой

трубы необходимо было бы пользоваться уравнениями Бернулли; при этом первая часть уравнения могла бы быть написана для того сечения $x-x$, в котором желательно определить давление p_x , а другое—для верхнего сечения трубы:

$$\frac{v_x^2}{2g} + \frac{p_x}{\Delta_n} + H_x = \frac{v_h^2}{2g} + \frac{p_h}{\Delta_n} + H + \xi_{x-h}.$$

Здесь H_x —вертикальное расстояние рассматриваемого сечения $x-x$ от уровня $o-o$, положительное или отрицательное, смотря по тому, выше или ниже $o-o$ это сечение расположено; ξ_{x-h} —высота, теряемая на сопротивления на пути от $x-x$ до верха трубы. При заданных размерах каналов и объеме протекающего газа все величины, входящие в написанное уравнение, являются известными, за исключением искомого давления p_x .

Величина давления p_x , и, в особенности, разность между внутренним давлением p_x и наружным давлением на том же уровне, укажет необходимую степень разрежения в печи и может служить показателем большей или меньшей целесообразности ее конструкции.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Часть II. Гидравлическая теория движения пламени в печах.

		<i>Стр.</i>		<i>Стр.</i>
Глава I.	Законы движения печных газов	3—28		
	Демонстрация движения пламени как движения легкой жидкости в тяжелой (4). Пламенный поток есть обращенная река (6). Приложение к пламени законов гидростатики (8). Связь между напором, давлением и скоростью в потоках капельных жидкостей и газов (13). Приложение к пламени законов истечения жидкости через отверстие в дне сосуда (16). Приложение теории водосливов к расчету отражательных печей (18). Нормальная скорость водосливов (22). Пламенные печи, основанные на идее газосливов с подпрудой (22). Приложение к пламени теории гидравлических фонтанов (25).			
Глава II.	Основы правильной конструкции печей	29—53		
	О делении потоков горячих газов (29). Вертикальные регенераторы (31). Лежачие регенераторы (32). Регенеративные воздухонагреватели (33). Уравнители температуры дутья (35). Воздухонагреватели с чугунными трубами (36). Камерные печи кирпичного и керамиковых производств (36). Цементационные печи (37). Печи для приготовления ковкого чугуна (37). Кольцевые печи (37). Муфельные печи (39). Вертикальные печи для закалки отжига и отпуска (40). Горизонтальные закалочные печи (41). Печи для отжига котельных листов (41). Печи для нагрева слитков с обыкновенной колосниковой решеткой (42). Нагревательные печи С и м е н с а (43). Колодцы с отоплением (44). Печи для нагревания слитков (45). Коридорные печи (51).			
	Глава III.		Основной принцип устройства безопасных газопроводов	53—58
	Глава IV.		Основной принцип правильного устройства пылеуловителей	58—63
			Газоочистители (59). Газгольдеры (62).	
	Глава V.		Основы правильной конструкции сушил	64—74
			Теория сушки (64). Конструкция сушил правильная и сушила уроды (71).	
	ЗаклЮчение.		Основные положения гидравлической теории (75) . . .	75—76
	Приложение.		Проф. И. Г. Е с ь м а н. «К теории движения газов в металлургических печах»	77—104
			Предисловие (79). Основные положения (79). Истечение газа из отверстий (82). Истечение через водослив (85). Равномерное движение газа (89). Неравномерное движение (94). Комбинации простых случаев движения (97).	