

4. Газодинамика конвективных систем

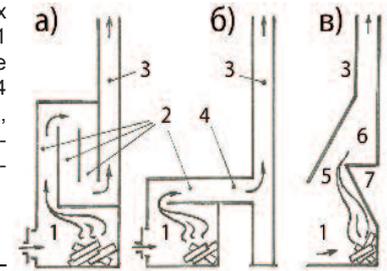
Продолжим анализ движений горячих газов на примере конвективных систем дровяных печей.

Под конвективной системой печи будем понимать весь тракт течения газов в печи, начиная от воздухозаборной заслонки топливника и кончая устьем дымовой трубы. Поступающий воздух вступает в реакцию горения с дровами в топливнике, образуя горячие дымовые газы, поступающие для утилизации тепла в систему теплосъемных каналов и полостей и затем через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу. Таким образом, конвекционная система печи является вентиляционной, имеющей участки нагрева и охлаждения газов /рис. 163/.

Часто под конвективной системой печей понимают лишь систему надтопочных теплосъемных каналов и полостей [105]. Такое формальное функциональное выделение отдельного узла из состава печи по сути ничего не дает, кроме порой непреодолимых методических трудностей. Дело в том, что система теплосъемных каналов находится под действием напора со стороны топливника и тяги со стороны дымовой трубы, и при анализе явлений необходимо рассматривать всю конвективную систему печи без разрывов причинно-следственных связей. С этой точки зрения, в состав конвективной системы печи приходится порой условно включать и внепечные пространства окружающей воздушной атмосферы, хотя они, конечно, не могут считаться частью печи.

В литературе имеются и терминологические разночтения. Так, каналы внутри печи часто называют газоходами, а каналы вне печи /например, дымовые трубы, соединительные патрубки, борова/ - дымоходами [105-107]. В то же время, в ГОСТ Р 53321-2009 под дымоходом понимается канал, "по которому осуществляется движение продуктов горения внутри печи", а под дымовым каналом или дымовой трубой понимается "канал для отвода дыма от печей и аппаратов и создания тяги". В СНиП 41-01-2003 и СП7.13130.2009 под дымоходом понимается "вертикальный канал прямоугольного или круглого сечения для создания тяги и

Рис.194. Конвективные системы кирпичных печей (а), металлических печей (б) и каминов (в). 1 - топливник /топка, камера сгорания/, 2 - дымовые каналы /газоходы/, 3 - дымовая труба /дымоход/, 4 - дымовой соединительный канал /дымоотвод, перекидной рукав, боров, дымоотводящий патрубок/, 5 - дымосборник, 6 - дымовая камера, 7 - дымовой зуб.



отвода дымовых газов от теплогенератора /котла/, печи и дымоотвода их вверх в атмосферу", а под дымоотводом понимается "канал для отвода дымовых газов от теплогенератора до дымохода или наружу через стену здания".

Во избежание подобных терминологических разночтений, будем называть условно все горячие газы - дымовыми, каналы внутри печи - "дымовыми каналами" 2, канал для создания тяги и удаления дыма в атмосферу - "дымовой трубой" 3, дымоотводящий патрубок от печи до дымовой трубы - "дымовым соединительным каналом" 4 /рис.194/.

4.1. Гидравлическая классификация печных устройств

Ранее мы проводили гидравлические аналогии течений горячих газов с течением воды в реке /стр.89/ и с течением воды по водопроводным трубам /стр.159/. Для приведения всех этих соображений в единую систему представлений, проведем более исчерпывающую аналогию между способами транспорта /перемещения-передвижения/ горячего дымового газа и воды. Это не позволит нам "пропустить" возможные технические решения по транспорту горячего дымового газа, поскольку схемы перемещения воды знают все на бытовом уровне с детства.

Вспомним, что существуют следующие способы транспортирования воды: ёмкостной ("ведрами"), водоводный (по лотку без напора), водопроводный гравитационный (по трубе с самонапором) и водопроводный насосный (по трубе с механическим принудительным напором).

4.1.1. Емкостные схемы транспорта

Ёмкостной способ водотранспорта - это перемещение бочек и цистерн. Поскольку вода тяжелее воздуха, то можно использовать и открытые емкости - ведра, стаканы, ковши, в том числе и в составе непрерывно работающих ведерных круговых водочерпалок /рис.195-а/.

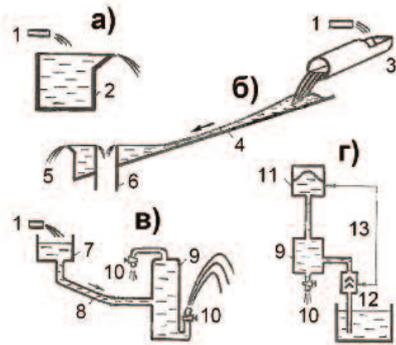


Рис. 195. Водотранспортные схемы: а - перемещение емкостями-сосудами, б - водоводы /беспонорные сети/, в - водопроводы самонапорные, г - водопроводы насосные. 1 - подача воды, 2 - емкость передвигаемая с системами наполнения и слива-перелива, 3 - труба незаполненная, 4 - жёлоб /лоток, канал, река/, 5 - накопительная емкость /водохранилище/, 6 - переливная труба, 7 - бак напорный, 8 - водопроводная труба герметичная заполненная, 9 - бак-водонакопитель, 10 - водовыпускные устройства, 11 - бак напорно-гидроаккумулирующий мембранный, 12 - водяной насос, 13 - автоматика отключения насоса.

Аналогичный способ газотранспорта - это перемещение баллонов с газом, в том числе и под давлением. Поскольку горячие дымовые газы являются легче воздуха, то появляется возможность транспорта горячего дыма колпаками /рис.196-а/ или “дымочерпалками”. Практического значения такой вид дымотранспорта не имеет.

Тем не менее, поскольку термин “колпак” широко используется в печной практике, поясним, что идеальный колпак – это абсолютно не проточный сосуд с горячими стенками, имеющий /как и опрокинутый стакан/ только одно отверстие, причём обязательно внизу, постоянно открытое в атмосферу так, чтобы давление газа на нижнем срезе никогда бы не отличалось от атмосферного.

Если горячий идеальный колпак заполнен горячими (относительно окружающей среды) дымовыми газами, то во всём колпаке возникает избыточное давление: в любом месте можно просверлить отверстие и убедиться, что газ выходит наружу точно также, как из отверстия в дне стакана всегда вытекает вода. Максимальное значение избыточного давления достигается в верхней части колпака, и в этом плане колпак ничем не отличается от тёплого помещения, открытого снизу /рис.93-94/.

Колпак принципиально невозможно переполнить горячими газами - излишки горячего газа тотчас выйдут из-под колпака точно так же, как и излишки воды всегда и немедленно перельются через края стакана.

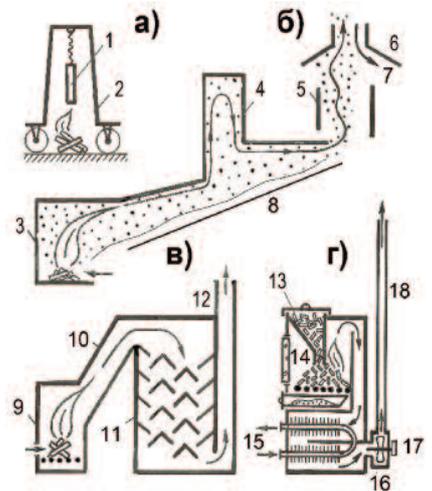
Что касается так называемых печных дымовых колпаков /куполов, колоколов/, то под этим термином чаще всего подразумеваются не идеальные колпаки с одним отверстием, а различного рода тупиковые или слабопроточные полости с двумя и более отверстиями в сети дымовых каналов водоводного или водопроводного типов или даже полнопроточные зонты-дымосборники /рис.194-в/.

4.1.2. Водоводные схемы транспорта

Водоводные способы транспорта являются простейшими непрерывно-проточными транспортными приемами /рис.195-б/, хорошо известными в природе в форме открытых “на атмосферу” последовательностей рек-ручьев, прудов-водохранилищ и водопадов-сливов-переливов. Реки могут быть даже “взяты в трубу” - лишь бы вода текла “свободно”, не “переполняя” /не заполняя, не перекрывая всё сечение/ трубы.

Движения воды в водоводах возникают благодаря толкающему действию самонапора воды сзади. “Всякое движение всякой жидкости есть результат расхода напора” [49,60]. Тянущее же разрежение /тяга/ спереди отсутствует. Появление запруд выше или ниже по течению воды ощущается не сразу. Действительно по уровню воды в Волге у Твери невозможно сразу определить, открылась или закрылась задвижка плотины ГЭС где-нибудь под Волгоградом. Реки могут течь тысячами километров под толкающим самонапором /при перепаде уровня воды/ лишь в десяток метров. Такие напоры в технике считаются малыми, и водоводные течения считаются условно безнапорными. При этом перепады давления в воздушной атмосфере (до 400 мм водяного столба) не могут препятствовать течению воды под самонапором. Ветер может свободно дуть над водой в ту или иную сторону и лишь при больших скоростях способен повернуть реку вспять /как Неву в Санкт-Петербурге/.

Рис. 196. Газотранспортные схемы /применительно к легким горячим дымовым газам/: а - перемещение в горячем колпаке /как в перевернутом стакане/, например, с подвесом разогретой болванки в транспортируемом колпаке, б - дымоходы /беспонорные сети самотечные/, в - дымопроводы самонапорные, вентиляторами, компрессорами/. 1 - технологическая болванка, 2 - горячий колпак транспортируемый, 3 - источник горячего конвективного потока /газонагреватель, топка/, 4 - колпак проточный, 5 - обечайка, 6 - зонт /дымоуловитель/, 7 - беспрепятственно текущие потоки холодного воздуха, 8 - картер, 9 - топливник, 10 - канал восходящий, 11 - канал нисходящий, 12 - труба, 13 - бункер с пеллетами, 14 - камера сгорания, 15 - теплообменник, 16 - вентилятор, 17 - двигатель, 18 - дымосброс.



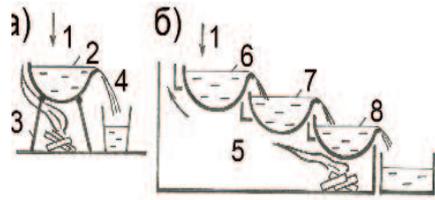


Рис.197. Древние водоводные способы непрерывного нагрева воды: а - древнегреческий способ, б - древнеримский способ. 1 - периодическая подача холодной воды из переносных сосудов, 2 - бронзовый сосуд на треножнике, 3 - открытый огонь, 4 - ванна /баня/ лаконикума, 5 - печь, 6, 7, 8 - нагреваемые сосуды, 6 - фригидарий, 7 - тепидарий, 8 - кальдарий.

Водоводный способ транспорта использует тот факт, что вода тяжелей воздуха и не может “выскочить” вверх из русла через берега реки. Применительно к горячим дымовым газам /более легким, чем окружающий воздух/ это означает, что их также можно транспортировать “реками”, только “обращенными”.

Мысленно переворачивая «вверх ногами» водоводную схему, заменяя воду на горячие дымовые газы, а воздух на холодный воздух, получаем дымоводную схему течения горячих дымовых газов /рис.196-б/. Такая схема отвечает идеальной гидравлической модели Грум-Гржимайло «вольного движения горячих газов». Всем известны свободноконвективные потоки /“столбы”/ горячих дымовых газов, поднимающиеся над кострами, “свободно” расстилающиеся по потолкам, перетекающие слоями под наклонными сводами, заполняющие дымовые колпаки и перетекающие из колпака в колпак, например, как в курных избах, русских печах, каминах, вентиляционных зонтах и т. п. /рис.163 /.

Горячие дымовые потоки, текущие горизонтально или наклонно под сводами /под перевёрнутыми лотками-желобами/, могут быть, в принципе, “взяты” снизу в “картер” 8 /поддон, кожух/. А горячие дымовые струи, не стесненно восходящие вверх /по аналогии с водопадами-переливами/, можно окружить с боков обечайкой 5 /рис.196-б/. Во всех этих случаях горячие газы будут течь /всплывать/ под собственным

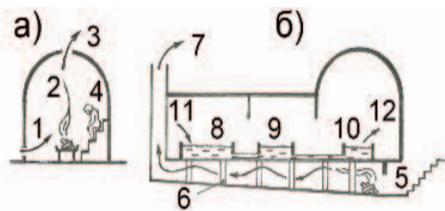


Рис.198. Древние дымоводные схемы транспорта горячих дымовых газов в печных системах: а - жаровня в древнегреческом лаконикуме, б - гипocaust в древнеримских термах. 1 - подсос свежего воздуха, 2 - дымовые газы, 3 - вентиляционное отверстие, 4 - скамья, 5 - топка гипocaustа, 6 - столбики, 7 - труба, 8 - фригидарий, 9 - тепидарий, 10 - кальдарий, 11 - подача воды кувшинами, 12 - вычерпывание.

самонапором /но без тяги/, лишь бы трубы и кожухи не “переполнялись”, то есть лишь бы горячие газы не перекрывали всё проходное сечение трубы. Действительно, если бы где-нибудь случайно появилось бы тянущее разрежение всплывающего горячего газа, то “свободные” перемещения холодных газов тотчас устанили бы возникшее разрежение.

Таким образом, в дымоводных схемах горячие газы /и в пространстве, и в трубах/ контактируют со “свободными” холодными газами 7 /рис.196-б/, которые могут течь произвольно «как хотят»/ - могут течь спутно с горячими газами, могут встречно. Трубные участки газоводных сетей обязательно должны иметь ограниченную длину (или же должны быть не герметичными), чтобы холодный газ в трубе был бы частью атмосферы. При этом давление в горячих газах строго равно давлению в холодных газах (в том числе и в атмосфере) в месте соприкосновения на том же высотном уровне (в отличие от газопроводных систем).

Водоводные схемы водогазотранспорта были первыми в мире способами непрерывной доставки больших масс воды, их нагрева, а также перемещения дымовых газов в печах /рис. 197-199-а/.

4.1.3. Водопроводные самонапорные схемы транспорта

Водопроводные способы транспорта принципиально отличаются от водоводных тем, что течение воды осуществляется не по открытым каналам, а по герметичным трубам /рис.195-в/. Трубы должны быть заполнены водой полностью, и воздух в них должен отсутствовать.

Так, если открытый канал водовода 4 /рис.199-а/ “взять” в герметичную трубу, а затем эту трубу опустить в низменность рельефа местности, то вода из трубы вылиться не сможет. Образовавшаяся система из двух колен сообщающихся сосудов позволит транспортировать воду с вершину на вершину без строительства моста-акведука. Более того, в

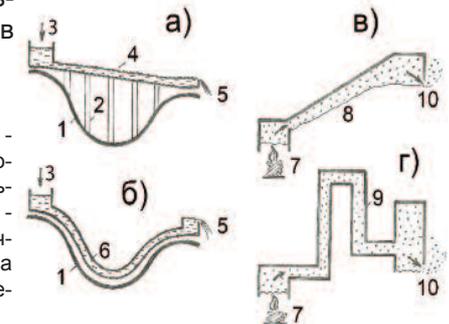


Рис.199. Гидравлические аналогии: а - водовод /акведук/, б - водопровод, в - дымовод, г - дымопровод самонапорный. 1 - рельеф местности, 2 - опоры, 3 - подача воды, 4 - открытый канал, 5 - отвод воды, 6 - герметичная труба, 7 - источник горячего дымового газа /костер/, 8 - перевернутый желоб, 9 - герметичные дымовые каналы, 10 - вывод дыма.

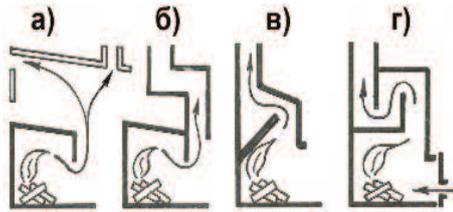


Рис.200. Переход от дымоводных систем к дымопроводным: а - курная духовая печь /арочная или сводовая топка/, б - белая сводовая печь /горнило/, в - камин классический, в - печь голландского типа с дымооборотами.

водопроводной системе транспортирующая труба может вышиться над начальной и конечной точками сети и работать как сифон.

Каждый объем воды в водопроводе испытывает тягу спереди и напор сзади. Перекрытие потока впереди или сзади в любом случае тотчас ощущается во всех участках водопроводной сети как “удар”.

В случае остановки непрерывного течения воды, водопроводы /как и водоводы/ тотчас перестают быть транспортными системами и превращаются в емкостные системы - в неподвижные водоемы, полностью заполненные водой и имеющие только напор на стенки /рис.195-в/.

Переворачивая вверх ногами водопроводную схему /рис.199-б/, получаем газовый аналог - горячую (именно горячую!) газопроводную схему - дымопроводную /рис.199-г/. Такая дымопроводная система должна быть всегда заполнена только горячими газами, холодные же газы могут располагаться только в окружающей воздушной атмосфере.

Характерной особенностью дымопроводных схем является возможность транспорта горячих дымовых газов сверху вниз, затем снизу вверх, или сначала снизу вверх, а потом сверху вниз /дымообороты/. В дымоводных схемах это не возможно - горячий газ попросту улетит в них вверх при попытке опустить потолочное русло дыма.

Как и водопроводы, дымопроводы должны быть герметичными, поскольку /в отличие от дымоводов/ имеют внутри себя давление газов, отличное от атмосферного. Газы в печи движутся под напором всплывающих горячих дымовых газов топливника и под тягой всплывающих горячих дымовых газов дымовой трубы. Соотношение величин напора и тяги определяется степенью открытости нижней /поддувальной/ и верхней /трубной/ задвижек печи на атмосферу.

Если в топке имеется разрежение, то печная система точно и безоговорочно является «водопроводной». Сообщающиеся же сосуды, как мы уже отмечали, всегда являются водопроводами. Поэтому перевернутые сообщающиеся сосуды /дымообороты с перевалом/ всегда являются газопроводами для горячих газов даже при сколь угодно широких каналах и полостях.

4.1.4. Водопроводные насосные схемы транспорта

Водопроводные системы с механическим напором отличаются тем, что напоры или разрежения /тяга/ воды создаются не только собственным весом самой воды /самонапором и самотягой/, но и внешними устройствами принудительного напора - насосами /рис.195-г/ При этом насосы могут быть нагнетательными /напорными/, проточными /сетевыми/ или откачивающими /всасывающими/.

Дымопроводные аналоги также широко известны как дымососные или дутьевые системы, которые позволяют отказаться от дымовой трубы как источника движения газов в отопительных котлах. Специфическим свойством дымососов является способность отводить горячие дымовые газы вбок и даже вниз. При этом открывается возможность охлаждения дымовых газов вплоть до температуры окружающей среды, что дает возможность не только повысить КПД устройств, но и очищать дымовые газы перед выбросом в атмосферу. Распространились также и бытовые вентиляторные аппараты на гранулированном древесном топливе /так называемые пеллеточные печи/, способные непрерывно работать на древесных /прессованных из древесной щепы и стружки/ таблетках-пеллетах /рис.196-г/.

4.1.5. Комбинированные схемы транспорта

Механические насосы могут использоваться не только в водопроводных, но и в водоводных системах, например, при передаче воды фонтаном /брандсбойтом/. А водоводные участки сети /реки/ могут переходить в емкостные /водочерпалки/, потом в самонапорные водопроводные /трубы/, затем и в водоводные /оросительные каналы/. Комбинирование видов водотransпорта может осуществляться не толь-

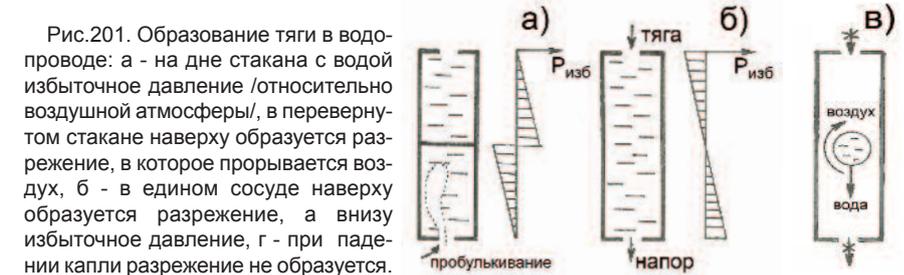


Рис.201. Образование тяги в водопроводе: а - на дне стакана с водой избыточное давление /относительно воздушной атмосферы/, в перевернутом стакане наверху образуется разрежение, в которое прорывается воздух, б - в едином сосуде наверху образуется разрежение, а внизу избыточное давление, г - при падении капли разрежение не образуется.



Рис.202. В многооборотной дымопроводной сети вспытие горячих дымовых газов происходит по сообщающимся сосудам фактически аналогично вспытию в едином сосуде.

ко последовательно, но и параллельно. Так, например, параллельно напорному водопроводу может идти

безнапорный водовод /открытый водный поток/ или целая сеть водоводов в грунте, в частности, из вытекающих из водопровода протечек.

Отсюда можно предположить, что аналогичным образом могут комбинироваться дымоходные и дымопроводные участки печного тракта - последовательно и параллельно. Действительно, весь путь развития печных устройств - это переход от дымоходных систем к дымопроводным /в том числе насосным/ через различные их комбинации.

Наиболее древние печные устройства - открытые очаги /костры, обложенные камнями/ и курные духовые печи /арочные или сводовые/ были чисто дымоходными конструкциями /рис.200-а/. Первые белые печи тоже были дымоходными с широкими дымосборниками и дымоотводящими трубами /дымниками, дымарями/, способными пропускать холодный воздух сверху при открытой трубной задвижке /рис.196-б/. Впоследствии белые печи стали обустраиваться боровами /горизонтальными участками/, превращающими бестяговый дымник в тяговую дымовую трубу - дымопровод /рис.200-б/, однако дымоходный характер движений газов внутри горнила сохранился.

В каминах начало трубы /хайло/ располагается в самом топливнике. Открытый топливник всегда является дымоходным без самотяги. Что касается каминных дымовых труб, то они вначале были очень широкими /дымоходными без тяги/, но со временем трубы стали делать дымопроводными - меньшего поперечного сечения с тягой дымовых газов /см. далее раздел б/.

Современные отопительные и отопительно-варочные печи являются дымопроводными. Первыми чисто дымопроводными печами стали отопительные печи "голладского" типа с закрывающимися дверками топливника и с дымооборотами /рис.200-г/.

Параллельные дымоходные и дымопроводные течения в печах не актуальны. Но их можно наблюдать при поддымливании каминов через портал или при растопке холодной печи - дымление от разгорающихся дров идет не только в трубу, но и сочится через неплотности прилеганий чугунной варочной плиты.

4.2. Тяга в водопроводной системе

Характерной чертой водопроводных и дымопроводных транспортных систем является наличие тяги - способность затягивать газы и жидкости. Сразу отметим, что слово "тяга" не совсем точно отражает смысл явления. Газы и жидкости не способны тянуть как веревка [60]. Но способны создавать в ограниченных пространствах области пониженного статического давления /разрежения/, что приводит к появлению напора со стороны внешних жидкостей или газов, находящихся при нормальном или избыточном давлении.

Еще раз поясним механизм появления тяги на примере сосуда, заполненного водой и находящегося в окружении воздушной земной атмосферы /рис.201/. Если этот сосуд разделен горизонтальной перегородкой, то сверху образуется "стакан" с избыточным давлением у дна /за счет напора весом жидкости вниз/, а снизу образуется "перевернутый стакан" с пониженным давлением /разрежением/ у потолка /за счет "тяги" - растяжения весом жидкости вниз/. В это разрежение у потолка устремляется /пробулькивает/ внешний воздух, что приводит к вытеканию воды из опрокинутого стакана. Для предотвращения вытекания заузим отверстия вверху и внизу сосуда /рис.201-а/.

Теперь удалим перегородку в сосуде. Распределение давлений в сосуде тут же кардинально изменяется - давление на уровне дна бывшего стакана и давление на уровне потолка бывшего перевернутого стакана сравниваются. Но перепады давления внутри сосуда сохраняются /рис.201-б/. Сосуд превращается в транспортную систему. Вода опускается вниз, создавая пониженное давление /разрежение/ в верхнем отверстии и избыточное давление /напор/ в нижнем отверстии. Пониженное давление в верхнем отверстии затягивает /воду или воздух, в первое мгновение это безразлично/, и этот эффект называют явлением тяги. В действительности же, как уже указывалось, величиной тяги в технической литературе принято называть степень разрежения, а силой, затягивающей в верхнее отверстие, является давление снаружи /точнее перепад давлений вне и внутри сосуда/. Тяга возникает в

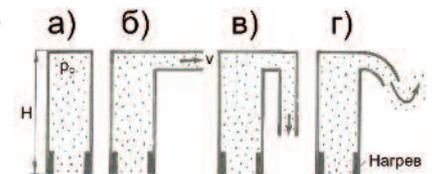


Рис.203. Горячий газ, поднимаясь вверх, набирает статическое давление p_0 (а) и расходуется на набор скорости V (б) и на опускание вниз - по каналу (в) или фонтаном (г).

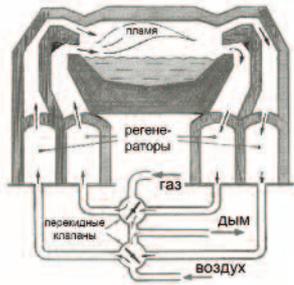


Рис.204. Принципиальная схема сталелитейной мартеновской печи.

момент появления транзитного течения в сосуде. Если же вода не заполняет все поперечное сечение сосуда, то “поршень воды”, движущийся вниз, как-бы “имеет дырку”, и такой насос не способен затягивать /всасывать/. Ни тяга, ни напор в этом случае не возникает. Так,

если в сосуде падает капля воды, не касающаяся стенок сосуда, то перетоки воздуха происходят внутри сосуда, и перепады давления в отверстиях сосуда не появляются /рис.201-в/.

В дымопроводных системах тяга возникает в нижнем отверстии, а напор - в верхнем /рис.202/, вне зависимости от того, разделен ли сосуд на каналы или нет. Ведь в сообщающихся сосудах, заполненных изотермическим газом, вес одного колена уравнивается весом другого. Согласно Грум-Гржимайло, “без расхода напора нет движения потока” [60]. Горячий газ, скапливаясь вверху полости, сжимается под действием подъемных сил нижележащих слоев горячего газа и тем самым создает напор $p_0 = (\rho_x - \rho_g)gH$ /избыточное давление по сравнению с внешней атмосферой на том же высотном уровне/. Этот напор при появлении течений расходуется на набор кинетической энергии, преодоление сопротивлений и на опускание горячего газа вниз /рис.203/.

Напор и тяга дымопровода используются в качестве естественных /не механических/ движителей газов. Так, в бытовых печах тяга засасывает воздух в топливник. А в мартеновских печах регенераторы /раскаленные камеры с огнеупорной насадкой/ засасывают своим разрежением /как всасывающим насосом/ воздух и доменные газы, разогревают их до 1000°C /для создания высоких температур пламени/, а затем подают их под напором /как нагнетающим насосом для создания нисходящего фонтана пламени/ в рабочую /плавильную/ зону печи скоростными струями на поверхность ванны с расплавленным металлом /рис.204/. Давление газов в рабочей зоне равно атмосферному, поскольку рабочая зона имеет негерметичные загрузочные окна. Поэтому отработанные горячие газы из печи удаляют разрежением /тягой/ дымовой трубы через другую пару регенераторов /и при этом нагревают их/. Направление движения газов в печи периодически изменяют на противоположное переключением перекидных клапанов так, чтобы нагревающие и нагревающиеся регенераторы поменялись местами.

4.3. Классификация печей по геометрии каналов внутри печи.

Сочетание дымопроводных и дымопроводных участков характерно для конвективных систем каминов, русских печей и барбекю. Современные отопительные и отопительно-варочные печи /металлические и кирпичные/ имеют исключительно дымопроводные конвективные системы.

Государственный стандарт ГОСТ 2127-47 /отмененный без замены с 01.01.1976г./ классифицировал теплоемкие отопительные печи по движению газов внутри печи /рис.205/:

- печи с движением газов по каналам, соединенным последовательно: однооборотные /черт.1/, двухоборотные /черт.2/, многооборотные с восходящим движением газов и с короткими вертикальными каналами /черт.3/,
- печи с движением газов по каналам, соединенным параллельно: однооборотные /черт.4/, двухоборотные /черт.5/,
- печи с движением газов без каналов, свободно внутри полостей печи: колпаковые /черт.6 и 7/,
- печи с движением газов по комбинированной системе каналов - последовательных, параллельных и без каналов: нижнего прогрева /черт.8, 9, 10, 11,12/, с воздухонагревательной камерой /черт.13/.

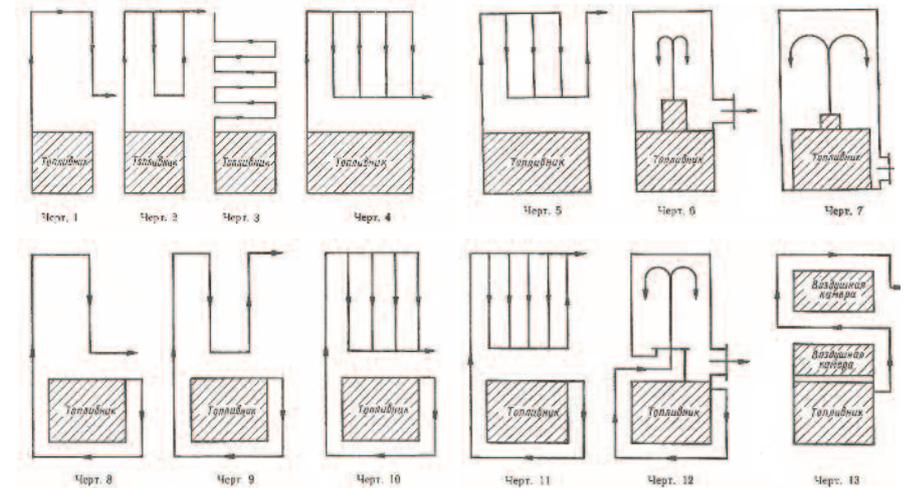


Рис.205. Классификация теплоемких отопительных печей по ГОСТ 2127-47.

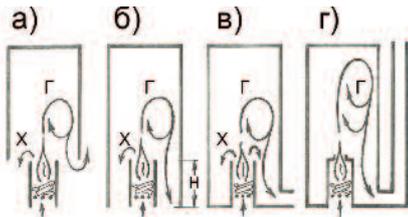


Рис.206. Колпаковые системы: а - колпак дымопроводный /Истинный/, б,в - колпаки дымопроводные над перевалами оборотно-канальной /противоточной/ системы с тягой на участке Н, г - колпак с фонтаном дымовых газов за счет заужения хайла.

Все вышеприведенные схемы являются дымопроводными, то есть “водопроводного типа” /с разрежением в топливнике/. Сомнения могут вызывать только колпаковые печи, в которых дымовые газы движутся якобы “свободно внутри полостей”, и, казалось бы, не подвергаются влиянию тяги дымовой трубы. Но в колпаковых печах “колпаки” не являются истинными “перевернутыми стаканами” водопроводного типа, открытыми снизу на атмосферу /рис.206-а/, а представляют собой тупиковые расширения в местах разворотов /перевалов/ оборотных канальных систем водопроводного типа /рис.206-в и рис.206-г/. Кроме того, горячие дымовые газы подаются в колпак чаще всего снизу вверх с разгоном, для чего В.Е.Грум-Гржимайло предусматривал даже заужение в хайле на входе в колпак для обеспечения продува колпака повышенной скоростью вдува дыма /рис.205, черт.6 и 7/. Колпаковые системы могут образовывать также самонапор /самотягу/ за счет разности весов колен противоточных каналов в пределах высоты Н /рис.206-б/.

4.4. Анализ конвективных систем с помощью эюр давления

Причинами появления горизонтальных движений /ускорений/ газов в печах являются перепады статического давления. При гравитационной конвекции эти перепады статического давления возникают из-за разницы весов газов в коленах сообщающихся сосудов /раздел 3.7.4/.

Возникшие перепады статического давления /в виде напора или тяги/ в случае движения расходятся на разгоны газа: статическое давление /статический напор - энергия сжатия газа/ переходит в динамическое давление /в скоростной напор - в кинетическую энергию движения газа/.

Но при круговом обороте газа по замкнутому контуру кинетическая энергия движения газа при возврате в исходную точку оказывается прежней. Это значит, что в случае отсутствия вязкости сумма перепадов статического давления по кругу должна быть равной нулю. А в случае наличия вязкости сумма перепадов давления равна сумме сопротивлений на трение и завихрения, что и положим в основу анализа [6].

4.4.1. Эюра давлений при отсутствии протока газов

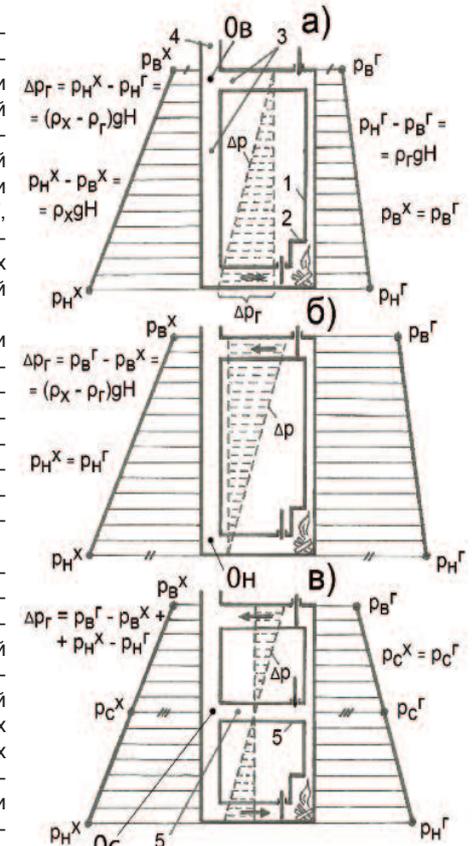
Представим себе горячую прямооточную печь как систему сообщающихся сосудов /рис.207/. А именно, добавим к печи 1 и дымовой трубе 2 умозрительный стояк холодного воздуха /с присоединительными каналами 3/, имитирующий внешнюю воздушную атмосферу. Полученный гипотетический замкнутый круговой канальный контур соединим с внешней воздушной атмосферой вертикальным патрубком-газоходом 4.

Рассмотрим сначала распределения давлений при отсутствии течения газов, то есть когда хотя бы одна из указанных задвижек закрыта.

Рис.207. Эюры /графики распределения/ статического давления газов в газоходах /стояках, каналах, столбах/ внутри прямооточной печи /справа/ и во внешней воздушной атмосфере /слева/ при отсутствии потоков газа: а - при открытой задвижке сверху /на дымовой трубе/ и закрытой задвижке снизу /на поддувале/, б - при закрытой задвижке сверху и открытой задвижке снизу, в - при закрытых задвижках сверху и снизу и открытой задвижке на срединном дымоходе.

Пространственные элементы: 0в, 0н и 0с - базисные точки отсчета давлений, 1 - дымовая труба, 2 - печь /топка/, 3 - гипотетические газоходы, имитирующие внешнюю атмосферу, 4 - гипотетический газоход, имитирующий воздействие /давление/ вышележащих слоев атмосферы, 5 - гипотетический срединный газоход /тягопрерыватель/.

Обозначения: р - давление, Δp_r - перепад /разница/ давлений между внутривидной средой и внешней воздушной атмосферой, ρ - плотность газа, н /нижний индекс/ - низ системы, в /верхний индекс/ - верх системы, г /верхний индекс/ - горячий газ /дымовые газы внутри печи и трубы/, х /верхний индекс/ - холодный газ /воздух атмосферы/, Н - высота печи с трубой, г - ускорение свободного давления, стрелки - направления движения газок при открытиях задвижек.



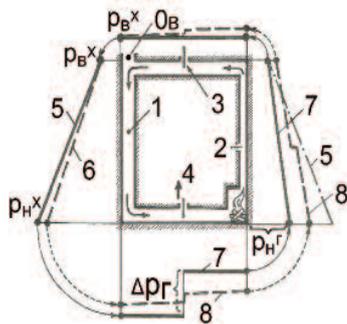


Рис.208. Круговые эпюры статических давлений внутри прямооточной печи и во внешней воздушной атмосфере при наличии циркуляционного потока газов: 1 - колено, имитирующее внешнюю воздушную атмосферу, 2, 3, 4 - задвижки в хайле на устье печи и поддувале топки, 5 - давление в атмосфере при отсутствии потока газа, 6 - давление в атмосфере при наличии потока газов с учетом потерь давления на трение, 7 - давление в неподвижных газах печи, 8 - давление в подвижных газах печи.

Тогда в отсутствии газовых потоков пространственные распределения статических давлений в коленах газовой системы будут определяться по законам гидростатики как алгебраические суммы давления в некоей базисной точке отсчета /0в, 0н или 0с/ и весов газов $\rho_{гН}$ в правом горячем /печном/ и левом холодном /воздушном/ коленах контура.

Графики пространственного распределения статических давлений будем называть условно для краткости эпюрами статического давления. Распределения давлений по высоте будем называть высотными эпюрами давлений, а распределения давлений по замкнутому контуру циркуляции - круговыми эпюрами давления.

При закрытой нижней задвижке /то есть при закрытом поддувале/ и открытой задвижке на трубе за базисную точку отсчета примем верхнюю точку 0в, общую как для устья трубы, так и для внешней воздушной атмосферы на том же высотном уровне /то есть $p_{вX} = p_{вГ}$. Поскольку вес стояка с горячим печным газом $\rho_{гН}$ меньше веса стояка с холодным атмосферным воздухом $\rho_{хГН}$, то статическое давление внутри печи на уровне колосниковой решетки $p_{нГ}$ /или пода печи/ будет меньше, чем статическое давление в воздушной атмосфере $p_{нX}$ на том же высотном уровне. То есть, величина $\Delta p = (p_{нX} - p_{нГ}) > 0$ всюду имеет положительное значение. Это значит, что во всем объеме печи мы будем иметь тягу /разрежение/ - воздух всасывается в любую возможную неплотность в стенках печи и трубы, в том числе и в приоткрывающееся поддувало /рис.207-а/. Первичной физической причиной появления тяги является разница весов колен $\Delta p = (p_{нX} - p_{нГ}) = (\rho_{х} - \rho_{г})gH$.

При открытой нижней задвижке /то есть при открытом поддувале/ и закрытой задвижке на трубе за базисную точку отсчета примем нижнюю точку 0н, общую как для колосниковой решетки /пода/ печи, так и для внешней воздушной атмосферы на том же высотном уровне /то есть

$p_{нX} = p_{нГ}$. В этом случае статическое давление внутри печи $p_{вГ}$ всюду будет больше, чем статическое давление в воздушной атмосфере $p_{вX}$ на том же высотном уровне. То есть величина $\Delta p = (p_{вX} - p_{вГ}) < 0$ всюду имеет отрицательное значение. Это значит, что во всем объеме печи мы будем иметь напор /избыточное давление/ - дымовые газы будут выбрасываться наружу через любую возможную неплотность в стенках печи и трубы, в том числе и через приоткрывающуюся трубу /рис.207-б/.

При протопке печи открыты и устье трубы, и дверка поддувала. То есть реализуется некая промежуточная схема, когда в поддувале имеется тяга /воздух засасывается в печь/, а в устье печи тяга имеется напор /дымовые газы выбрасываются из печи/. При этом неизбежно возникает ситуация, когда на некоем высотном уровне 0с тяга становится равной нулю - на этом высотном уровне можно сделать дырку 5 в работающей печи, и воздух в нее засасываться не будет, точно также, как не будут выбрасываться дымовые газы /рис.207-в/. Отвечающая такому случаю эпюра давлений в отсутствие протока газов отвечает ситуации, когда верхняя, и нижняя задвижки закрыты, а открыта некая средняя задвижка в патрубке 5, и при этом $p_{сX} = p_{сГ}$. Отверстие 5 называется "разрывом дымовой струи", а в газовых котлах "тягопрерывателем". Высотное расположение уровня нулевой тяги 5 /"нейтрального уровня"/ может изменяться в ходе протопки как из-за изменения положения задвижек, так и из-за изменения характеристик горения дров.

Рассмотренные эпюры давлений в печах аналогичны эпюрам давления в вентилируемых теплых зданиях /рис.94/. В реальных ситуациях эти эпюры статических давлений в печах и зданиях приходится согласовывать между собой, особенно в случаях открытых очагов и каминов.

4.4.2. Эпюра давлений при наличии протока газов

При появлении протока газов вышерассмотренный замкнутый контур превращается в циркуляционный, по сути аналогичный циркуляционному контуру системы водяного отопления здания, но заполненного не водой, а воздухом и дымовыми газами /рис.193-а/.

Единственно возможной базисной точкой отсчета в этом случае может быть только верхняя точка контура 0в, поскольку ни при каких потоках газов в циркуляционном контуре численное значение величины статического давления в ней $p_{вX}$ измениться не может. Статическое давление $p_{вX}$ в точке 0в всегда равно весу /напору/ воздушного столба невозмущенной атмосферы над этой точкой /рис.208/. Поэтому при анализе приходится исходить из статической эпюры давлений, реализующейся

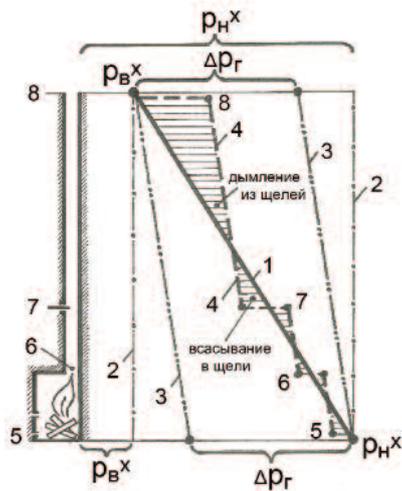


Рис.209. Высотные эпюры статических давлений в прямоточной печи: 1 - эпюра в невозмущенной неподвижной воздушной атмосфере вне печи, 2 - "коридор" возможных изменений давления внутри печи, 3 - "уточненный коридор" возможных изменений давления внутри печи, 4 - эпюра статических давлений внутри печи в потоке дымовых газов при наличии местных скачкообразных газодинамических потерь на завихрения, 5 - местное сопротивление в дверке поддувала, 6 - местное сопротивление в хайле, 7 - местное сопротивление в приоткрытой задвижке, 8 - местное сопротивление в устье трубы.

при закрытой нижней задвижке /рис.207-а/. Эта высотная эпюра давлений в отсутствие протока газов

перерисовывается в круговую эпюру давлений 7 /рис.208/ с единственным перепадом давления - тягой Δp_G на закрытой нижней задвижке 4 /на закрытой дверке поддувала/.

Как только нижняя задвижка 4 /дверка поддувала/ приоткрывается, тотчас появляется проток газа. При этом единственный перепад статического давления Δp_G в замкнутом контуре перераспределяется - появляются локальные перепады статического давления в местах местных гидродинамических сопротивлений /в нашем случае на задвижках/ из-за завихрений /турбулентностей/ и распределенные перепады давления по тракту течения из-за трения. Перепад статического давления на нижней задвижке /дверке поддувала/ снижается, однако сумма перепадов статических давлений по замкнутому тракту течения не изменяется и сохраняется равной исходному движущему круговому перепаду статического давления Δp_G /эпюра 8/.

Каждый из перепадов статического давления в местах сопротивлений тратится на разгон газов, но эти разгоны тотчас расходуются на преодоление /компенсацию/ сопротивлений движению. Так, например, постепенные перепады статического давления по тракту, казалось бы, должны были бы разгонять газ, но ведь эти перепады статического давления и образовались только из-за необходимости противодействия появляющимся потерям на трение. То есть, перепады статического давления /потенциальной энергии сжатия/ должны были бы расходоваться на повышение скорости движения - на повышение динамического давления /кинетической энергии/. Но вследствие необходимости компенсации потерь на турбулентности и трение этого не происходит /в отличие от случая идеальной жидкости/. Можно рассуждать и наоборот - возникающие сопротивления вызывают появление перепадов давления для сохранения поступательного движения газов.

Собственно именно в этом проявляется тезис о снижении полного давления /суммы статического и динамического давлений/ из-за сопротивлений. Так что, несмотря на наличие перепадов статического давления, кинетическая энергия в контуре сохраняется. Сохраняется и общая сумма перепадов статического давления в контуре, равная сумме сопротивлений в контуре /см.стр.126/.

Говоря о круговом перепаде статического давления Δp_G в контуре, надо напомнить, что само понятие статического давления здесь по физической сути является вторичным. Первичным же понятием является вес столба газа /колена газа/, который и компенсируется появлением статического давления газа /сжатия газа внизу/ так, чтобы столб газа не падал бы самопроизвольно вниз под действием силы тяжести. По закону гидростатики при отсутствии движений газа статическое давление внизу столба газа алгебраически равно /но не тождественно по физическому смыслу/ весу столба газа $p = \rho gh$. А горизонтальный перепад давления вызывается разностью весов колен сообщающихся сосудов.

Вышеуказанное замечание сохраняет свою силу и при круговой циркуляции газа при наличии разности весов колен сообщающихся сосудов /см.раздел 3.7.4/. Рассмотрим любую точку внизу контура вне задвижки поз.4 /рис.208/. Параметры газа чуть левой от этой точки обозначим с индексом "х", а чуть правей - индексом "г". При расположении этих точек бесконечно близко друг к другу, можно принять, что статическое давление p_x равно статическому давлению p_r , а скорость V_x равна скорости V_r . При равенстве высот колен $h_x = h_r = h$ получаем из уравнения Бернулли $(p_x + \rho_x g h_x + \rho V_x^2 / 2) = (p_r + \rho_r g h_r + \rho V_r^2 / 2) + \Delta p_{\text{вихр}} + \Delta p_{\text{тр}}$ условие движения $(\rho_x - \rho_r)gh = \Delta p_{\text{вихр}} + \Delta p_{\text{тр}}$. То есть вся разность весов колен оказывается равной невосполнимым потерям статического давления на завихрения и на трение. Вот эта величина разности весов колен $(\rho_x - \rho_r)gh$ и обозначена условно как круговой перепад Δp_G /как расчетный перепад статического давления при отсутствии протока/.

4.4.3. Эпюра давления в допустимом "коридоре" значений

Невосполнимые потери давления /на завихрения и трение/ в левом колене, имитирующем столб внешнего атмосферного воздуха, всегда пренебрежимо малы по сравнению с невосполнимыми потерями давления внутри печи /рис.208/. Поэтому при экспресс-анализе можно рассматривать вместо круговой эпюры некую высотную эпюру статических давлений внутри печи, построенную на основе следующих соображений.

Распределения статических давлений в печи не могут выйти за пределы "коридора" базисных величин p_v^X и p_n^X , задаваемых состоянием

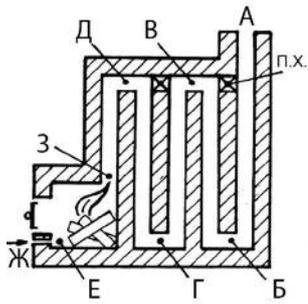


Рис.210. Принципиальная схема модельной печи двухоборотная. Распределение статических давлений с привязкой к базисным точкам приведено на рис.211.

атмосферы на уровнях устья трубы и поддувала /пода печи/ и изображенных штрихпунктирными прямыми 2 /рис.209/. То есть статическое давление в любой точке печи не может быть меньше, чем статическое давление в воздушной атмосфере на уровне устья трубы,

а также не может быть больше, чем статическое давление в воздушной атмосфере на уровне поддувала /пода/ печи. При этом прямая 1 отвечает эпюре статического давления в воздушной атмосфере вне печи.

Более того, распределения давлений в печи не могут выйти за пределы “коридора” допустимых значений, ограниченного штрихпунктирными прямыми 3. Это обусловлено тем, что разница статических давлений внутри печи и вне печи не может превышать величину кругового перепада статических давлений Δp_T . При этом правая прямая 3 отвечает эпюре статических давлений при закрытой трубе, а левая прямая 3 - эпюре статических давлений при закрытом поддувале.

Задаваясь конкретными величинами ξ коэффициентов сопротивления трения и коэффициентов газодинамического сопротивления /см. стр. 126/, рассчитываем скорость газового потока V по известной величине кругового перепада статических давлений $\Delta p_T = \sum [\xi(\rho V^2/2)]$, а затем рассчитываем величины перепадов давления. Например, в простейшем случае безоборотной печи с четырьмя местными газодинамическими сопротивлениями /поддувалом 5, хайлом 6, приоткрытой задвижкой на трубе 7 и устьем трубы 8/ имеем эпюру статических давлений 4 с четырьмя локальными перепадами давления /рис.209/.

Ломаная линия 4 вьется вокруг прямой 1, которая отвечает эпюре статических давлений в воздушной атмосфере вне печи /или внутри печи при полном отсутствии сопротивлений движению/. В результате имеем участки всасывания /тяги/ после мест сопротивлений и участки дымлений /напора/ до мест сопротивления. Сумма величин локальных перепадов статических давлений равна, как и прежде, величине кругового перепада статического давления $\Delta p_T = (\rho_x - \rho_T)gh$. Так, прикрывая дверку поддувала, мы увеличиваем разрежение в топливнике, а прикрывая задвижку на трубе мы уменьшаем разрежение в топливнике, хотя в том и другом случае мы снижаем расход газов через печь.

Для снижения перепада статического давления в устье дымовой трубы /и повышения пожаробезопасности путем снижения избыточного статического давления в трубе/ ранее, преимущественно в открытых каминах, применяли расширяющиеся оголовки труб. Ведь раструб уменьшает сопротивление истечения дыма из-за предотвращения эжекционного увлечения внешнего воздуха и, вследствие этого, из-за снижения торможения потока дыма /см. рис.151/. Из эпюры на рис. 209 видно, что снижение сопротивления устья трубы приводит к повышению разрежения /к снижению статического давления/ в топливнике.

4.4.4. Эпюра давления в многооборотной печи

Рассмотрим печь /как и прежде в однородно нагретом состоянии/ многооборотную с закрытыми задвижками прямого /летнего, растопочного/ хода ПХ /рис.210/. Расчет эпюры давлений произведем по методике предыдущего раздела. В качестве вертикальной пространственной координаты примем не высоту, а расстояние по тракту течения от поддувала до устья трубы вдоль дымовых каналов /рис.211/.

Характерным отличием многооборотной печи является наличие участков с возрастающим статическим давлением вдоль по тракту течения газов. То есть газ движется в опускных каналах в сторону возрастания статического давления. Такая ситуация зачастую ложно оценивается печниками как невероятная, поскольку обычно считается, что газ всегда самопроизвольно стремится именно в сторону пониженных давлений, а горячий газ - именно вверх. Поэтому печники часто полагают, что нисходящие каналы якобы “с трудом” пропускают горячие газы, поскольку приходится преодолевать “противодавление”. Вследствие этого нисходящие каналы стараются сделать пошире, чтобы дымовые газы “легче шли” вниз.

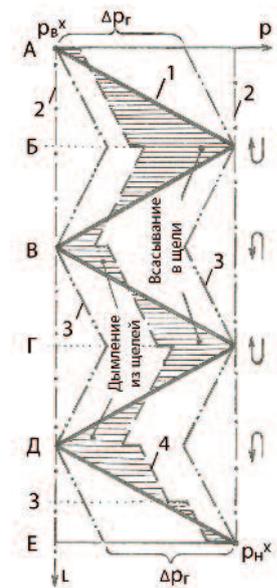


Рис.211. Схематический вид эпюр статического давления вдоль тракта дымоходов L в модельной двухоборотной печи с неизменной температурой газа в каналах. Обозначения те же, что и на рис.209. Схема печи и расположение базисных точек приведены на рис. 210.

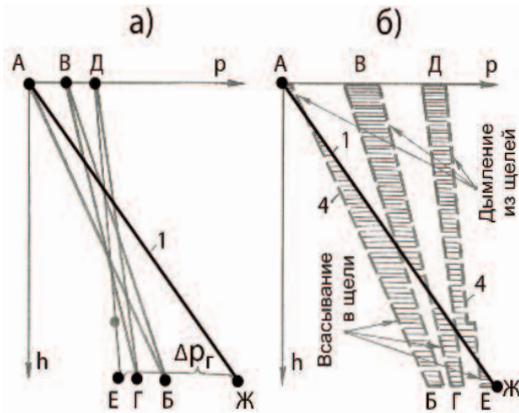


Рис.212. Высотные эпюры статического давления в модельной печи с двухоборотным дымоходом с учетом снижения температуры дымовых газов вдоль по тракту печи: а - при отсутствии потока газов при закрытом поддувале, б - при наличии потока газов с учетом местных газодинамических потерь давления на завихрения потоков газа. Обозначения и расположения базисных точек те же, что и на рис.209-211.

Вопреку этому расхожому мнению, в факте повышения статического давления вдоль по тракту течения нет ничего необычного. Никого ведь не смущают вертикальные волны /изгибы/ на шланге, по которому вода течет, например, из бака на эстакаде в бочку на земле, хотя вода в шланге попеременно то поднимается вверх, то опускается вниз. Действительно, повышение статического давления - это просто следствие самопроизвольного сжатия объемов газа под действием веса вышележащих объемов газа /при погружении объемов газа на большую глубину/. А волны шланга /обороты/ - это просто сообщающиеся сосуды.

Для определения возможности движения газа надо сравнивать не просто перепады статического давления, а перепады статического давления в газе именно на одном и том же высотном уровне /по горизонтали/. Поэтому вернемся к высотным эпюрам, которые хотя и более громоздки графически, но позволяют наглядно проводить подобные сопоставления. Тем более, что такие эпюры могут легко учитывать снижение температуры дымовых газов вдоль по тракту течения газов.

За базисную точку примем точку над устьем трубы А, где давление в печи при отсутствии потока газа равно давлению во внешней атмосфере /рис.210/. Высотная эпюра статического давления во внешней воздушной атмосфере задана прямой 1 /рис.212/. Высотная эпюра статического давления внутри печи для случая отсутствия потока газов строится сверху из точки А вниз, как и прежде, путем добавления к базисному давлению в точке А веса столба дымового газа внутри печи. То есть сначала находим статическое давление в точке Б как сумму статического давления в точке А плюс вес столба газа АБ. Затем находим статическое давление в точке В как разность статического давления в точке Б минус вес столба газа БВ. И так далее по другим каналам.

Если температура в колене АБ ниже, чем в колене БВ /а значит и вес столба газа АБ больше, чем вес столба газа БВ/, то отрезок БВ рисуется круче, чем отрезок АБ. Продолжая такие построения, получаем ломаную линию АВГДЕ, отвечающую случаю отсутствия потока газов, но наличия снижений температуры газов вдоль по тракту печи от топки до устья трубы /рис.212-а/. Ясно, что при отсутствии снижения температур (при равенстве температур всюду во всех коммуникациях печи) отрезки ломаной линии АВГДЕ сливаются воедино в некую прямую АЕ. Если же температура меняется не только скачками в местах поворотов (разворотов) потоков, но и постепенно /непрерывно в пределах каждого канала из-за охлаждения на стенках/, то отрезки прямых между буквами превращаются в кривые (без изменения качественных закономерностей).

Из рис.212-а видно, что при отсутствии потока газов статическое давление в точках Б и Г оказывается большим, чем в точке Е. Это означает, что если при закрытом поддувале делать некие малые пробные отверстия /байпасы, прогары, "сухие швы"/ из точек Б или Г в точку Е, то появится встречный поток газа - циркуляционный. В частности, это является причиной появления циркуляций дыма в топке при растопке печи. Как будет показано ниже, при открытии поддувала возможность появления такого явления пропадает.

В случае открытого поддувала /при появлении потока газов/ в точках разворотов потоков газа возникают местные газодинамические сопротивления на завихрения. Эпюра давлений при этом резко изменяется /рис.212-б/. Появляются перепады давления в поддувале и в устье дымовой трубы, а также в точках разворотов, "растаскивающие" отрезки АБ, БВ, ВГ, ГД, ДЕ "в стороны". Статическое давление в точках Б и Г становится меньшим, чем в точке Е, то есть возможность циркуляционных явлений в байпасах исчезает. Интересен факт наличия в точках В и Д большего статического давления, чем в устье дымовой трубы. Это означает не просто возможность появления дымления из щелей печи в окрестностях этих точек, но и возможность выбивания пламени наружу, несмотря на наличие тяги трубы. В то же время в точках Б и Г имеются значительные разрежения, повышающие пожарную безопасность печи при возможных нарушениях герметичности стенок в этих точках.

4.4.5. Эпюра давления в двухярусной печи

Аналогичный анализ конвективных явлений можно произвести по высотным эпюрам статического давления и для двухярусных печей: колпаковых /рис.213-а/ и канальных оборотных-противоточных /рис.213-б/.

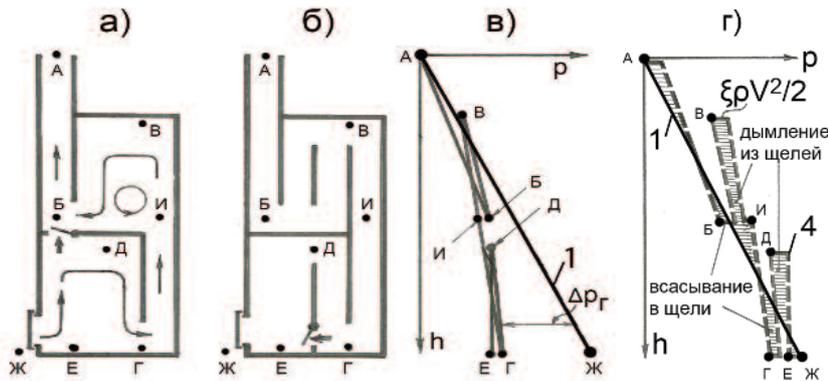


Рис.213. Эпюры статического давления в двухъярусной печи с учетом снижения температуры дымовых газов вдоль по тракту течения: а - схема колпаковой печи, б - схема канальной печи, в - высотная эпюра при отсутствии потока газов, г - высотная эпюра при наличии потока газов. Базисные точки идентифицированы заглавными буквами. Сплошная прямая линия 1 - распределение статического давления во внешней воздушной атмосфере. Пунктирная ломаная линия 4 - распределение статического давления внутри печи при наличии протока газов с учетом местных газодинамических потерь.

Качественный вид эпюр давления в колпаковой и канальной печах одинаков как в случае отсутствия потока газов /рис.213-в/, так и при наличии потока газов /рис.213-г/. Подтверждается высокое значение величин статического давления у перекрыш колпаков и в перевалах каналов в точках В и Д, особенно при наличии потока газов /рис.213-г/. Разница давлений в точках Б и Д, не существенная в случае малых потоков газа /рис.213-в/, становится значительной при больших потоках газов, то есть задвижка прямого /летнего/ хода должна с очевидностью прикрываться на стадии активного пламенного горения дров.

Отличие колпаковой схемы /рис.213-а/ от канальной оборотной-противоточной схемы /рис.213-б/ заключается в возможности циркуляции газа /обратного тока/ в колпаке при малых расходах газов через печь под действием повышенного давления в точке Б относительно точки И /рис.213-в/. В канальной же схеме такая циркуляция предотвращена глухими стенками подъемного канала. Но при большом расходе газа наличие местных газодинамических потерь давления прекращает циркуляционное движение газов в колпаках обоих ярусов, поскольку давление в точке И становится больше, чем давление в точке Б., а давление в точке Е становится больше, чем давление в точке Г /рис.213-г/.

4.5. Особенности течений в полостях и каналах

Таким образом, из расчетных эпюр рис.213 следует общий нетривиальный вывод - при малых расходах газов в полостях (колпаках) преобладают циркуляционные процессы, а при увеличенных расходах газов в полостях (колпаках) преобладают проточные процессы с подавлением циркуляции газов.

Этот важный результат является следствием двух принятых фактов - наличия постепенного снижения температуры /охлаждения/ дымовых газов вдоль по тракту печи /а значит, и наличия разных весов столбов газов в сообщающихся коленах/ и наличия сопротивлений /необратимых потерь давления/ на трение или завихрения.

Любая печная конвективная система (как последовательность полостей и каналов) по крайней мере в двух точках соединена с внешним пространством. Как уже неоднократно напоминалось, в этой системе можно «нарисовать» два типа замкнутых кривых траекторий движения газов.

Первый тип – это сквозные траектории, проходящие по всему внутреннему тракту печи, выходящие наружу и затем вновь входящие в печь. Это вентиляционные траектории, замыкающиеся вне печи.

Второй тип – это круговые траектории, располагающиеся только внутри печи и не выходящие наружу. Это циркуляционные траектории, замыкающиеся «сами на себя» внутри печей /см.раздел 3.4/.

Вентиляционные течения обусловлены наличием гравитационной самотяги печи, в том числе и дымовой трубы. Тем не менее, такие течения печники часто называют условно «вынужденными или принудительными движениями газов», поскольку они подобны /но далеко не тождественны/ приточно-вытяжным течениям, возникающим с помощью механических вентиляторов. Ранее, описывая такие самопроизвольные вентиляционные течения, мы воспользовались термином «транзитных движений газов», чтобы пояснить физическую природу течений и дистанцироваться от действительно принудительных движений газов под действием механических вентиляторов /см.раздел 3.6.5/.

Циркуляционные течения обусловлены температурной и газодинамической неоднородностью потоков газов в полостях. Именно циркуляционные течения часто называют условно «свободными движениями газов внутри полостей» в том смысле, что они не определяются самотягой печи, в том числе и дымовой трубы.

Если раньше считалось, что итоговые течения в печи оцениваются суммированием движений по сквозным вентиляционным и внутренним циркуляционным траекториям, то сейчас уточняется, что при больших

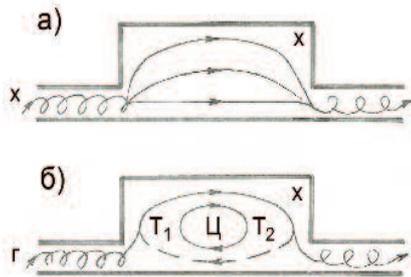


Рис.214. Различия течений газов в полостях и каналах: а - исчезновение турбулентности при переходе потока газа из канала в полость /колпак/, б - появление циркуляции газов при переходе потока горячего газа из канала в холодный колпак.

расходах газов сквозные вентиляционные течения становятся преобладающими, а внутренние циркуляционные течения - несущественными.

Полости приобретают свойства прямооточных каналов. То есть, колпаковые печи /рис.205, черт.6 и 7/ "со свободными движениями газов внутри полостей" при больших расходах дымовых газов могут превратиться по сути в каналные печи /с изменяющимися сечениями каналов, но с однонаправленными вентиляционными потоками/.

4.5.1. Разграничение понятий полостей и каналов

Печные полости /и колпаки/ соединены между собой и с внешней атмосферой различного рода отверстиями и каналами /в том числе воздухозаборными отверстиями-поддувалами и дымовыми трубами/. Так что печь представляет собой последовательную совокупность полостей и каналов, соединенных воедино гидравлически и объединенных общим /одним и тем же/ сквозным вентиляционным потоком газа.

Полости печи отличаются от каналов в первую очередь чисто геометрически - большей площадью поперечного "живого" проходного сечения. По сути, полости - это расширенные каналы или повороты.

Во-вторых, поскольку массовый расход газов по тракту печи остается неизменным, то линейные скорости продвижения дымовых газов по каналам оказываются более высокими, чем по полостям. Значит, полости - это каналы с малой скоростью транзитных течений. При такой постановке вопроса ясно, что снижение скорости газового потока в печи эквивалентно трансформации каналов в некие проточные полости.

В-третьих, в печной практике обычно полагают, что каналы имеют однонаправленные потоки газов, а в полостях возможны и разнонаправленные /встречные, циркуляционные/ потоки, в том числе и "свободные", не зависящие от факта наличия протока газов через всю печь. Ясно при этом, что переходы газов из каналов в полости /и наоборот/ могут сопровождаться перестройками характера течений газов.

Чем больше вязкость газа /то есть, чем горячее газ/, тем меньше вероятность возникновения разнонаправленности потоков /в том числе и турбулентностей/, поскольку за счет вязкости один поток может увлечь за собой другой поток /даже встречный, но малоэнергичный/. Такое явление вязкого увлечения называется эжекцией /см. раздел 2.5.5/.

Для качественной оценки возможности сосуществования разнонаправленных потоков, надо сопоставить импульс газа (инерцию) ρV^2 с силой вязкого взаимодействия потоков /в том числе и с силой противодействия встречному движению/ $\mu dV/dx = \mu V/L$, где dV/dx - градиент скорости, L - поперечный размер канала, μ - коэффициент динамической вязкости /рис.81/. Полученное безразмерное соотношение указанных величин $Re = \rho V L / \mu$ называется числом Рейнольдса /см.раздел 2.5.2/.

Число Рейнольдса отражает, образно говоря, время /продолжительность/, за которое встречные потоки станут спутными, то есть как быстро силы вязкости подавят имеющиеся встречные движения газов. Малые величины числа Рейнольдса означают, что встречные потоки погасят сами себя быстро и превратятся в спутные. То есть малые числа Рейнольдса отвечают не просто ламинарным потокам, но и обязательно спутным /при наличии непосредственного контакта потоков/. Из числа Рейнольдса следует, что при фиксированной величине линейной скорости V малым диаметрам проходов /то есть каналам/ соответствует однонаправленное /ламинарное/ движение, а большим диаметрам проходов /то есть полостям/ соответствует возможность разнонаправленных /турбулентных или циркуляционных/ движений газа.

Однако, в печах фиксированы /то есть неизменны по тракту течения/ не линейные скорости потоков, а массовые расходы газов $G = \rho V S$, где $S = L^2$ - площадь поперечного сечения канала или полости. Тогда из числа Рейнольдса $Re = G / L \mu$, выраженного через массовый расход, следует, что при сохранении массового потока газа $G = const$ в последовательно соединённых каналах и полостях числа Рейнольдса будут больше именно в каналах /с малыми L /, а не в полостях /с большими L /.

То есть газ в печи, подвергнутый /может быть, и однократно/ механическому возмущению в какой-либо точке, будет «успокаиваться» быстрее в полости, чем в канале. В соответствии с этим и турбулентность возникает при $Re = 2300$ вначале в каналах, и лишь потом в полостях, а в крупных полостях может не возникнуть вовсе. Это известный факт - пульсации газа в трубах затухают медленнее, чем в сосудах /ресиверах/. Так, в системах автомобильного выхлопа рев двигателя удается подавить отнюдь не трубами, а именно полостями - глушителями /в том числе с тупиковыми ответвлениями - резонаторами/.

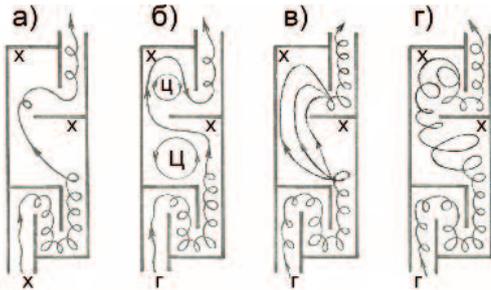


Рис.215. Общий характер течений газов в полостях и каналах: а - продув холодного газа через холодную печь "модель глушителя", б - малая скорость горячих газов, в - средняя скорость горячих газов, г - высокая скорость горячих газов.

Применительно к печам это означает, что в каналах, например, с проходным сечением 12х12см "в полкирпича", турбулентность наступает в случае температуры газа 200°C при линейной скорости газа 0,25 м/сек (при объемном расходе газа 14 м³/час), а в случае температуры газа 300°C - при линейной скорости газа 1,0 м/сек (при объемном расходе газа 50 м³/час). При характерных объемных расходах газов в типичных печах 50-200 м³/час (то есть "нормальных кубов" - приведенных к температуре 200°C) газ в каналах находится в турбулентном состоянии, а в полостях (с проходными сечениями в несколько раз большими) - в ламинарном состоянии /рис.214-а/.

Такой результат представляется с первого взгляда неожиданным - ведь печники обычно считают, что именно для полостей характерны "свободные закрутки" газов. Но печники имеют ввиду не турбулентные встречные движения в полостях, а именно циркуляционные встречные движения в полостях за счет упорядочных всплываний горячих газов.

Поэтому сопоставим силу архимеда всплывания $(\rho_x - \rho_\Gamma)gH = \rho gH\Delta T/T$ с силами вязкости $\mu V/L$, где ΔT - разница абсолютных /то есть в градусах Кельвина/ температур газа и стенок, H - высота полости (колпака), L - размер проходного сечения потока газа. Полученное отношение указанных величин $Gr = \rho gHL\Delta T/\mu VT = \rho^2 gHL^3\Delta T/\mu GT$ называется числом Грасгофа и отражает, образно говоря, время /продолжительность/, за которое силы вязкости подавят в полости циркуляции газов - встречные движения восходящих горячих и нисходящих холодных газов.

Большие значения числа Грасгофа Gr отвечают «активной» полости, в которой всё бурлит /циркулирует/ от «свободного движения всплывающих газов» /рис.214-б/. Активность циркуляций в полости снижается при росте массового расхода газов G /именно сквозного транзитного/, с уменьшением разницы температур горячего газа и холодных стенок ΔT и особенно с уменьшением размеров полости HL^3 /рис.215/.

Малые значения числа Грасгофа Gr отвечают «мертвой» полости, в которой потоки газа не только ламинарны, но и однонаправлены.

4.5.2. Виды встречных течений

Ранее /см. раздел 3.7.1/ было введено понятие безразмерного числа Архимеда $Ar = (\rho_x - \rho_\Gamma)gH/\rho V^2 = gH\Delta T/TV^2$ как соотношения кинетических энергий циркуляционного и вентиляционного /сквозного/ потоков газов в полости. Видно, что безразмерное число Грасгофа равно произведению безразмерных чисел Архимеда и Рейнольдса $Gr = ArRe$.

Отсюда следует, что встречные течения могут реализовываться либо при больших числах Архимеда Ar /то есть при свободноконвективных циркуляциях/ или при больших числах Re /то есть при турбулентностях/.

Напомним, что сквозные вентиляционные течения являются по сути также циркуляционными /рис.172-а/, но замыкающимися во внешней воздушной атмосфере /рис.172-б/. При этом вентиляционные течения в печах могут быть и встречными /рис.216/. То есть в печи в принципе могут существовать не только восходящие вентиляционные течения 1 "прямая тяга", но и нисходящие 2 "обращенная тяга".

Ясно, что одновременное присутствие восходящих и нисходящих вентиляционных потоков отвечает случаю отсутствия тяги /однаправленности/, когда газы могут "течь свободно" /в том числе хаотично, произвольно, неупорядоченно/. Но в то же время, нисходящие вентиляционные потоки не могут рассматриваться как "тонущие" в горячих газах, поскольку любой столб газа в печи /как колено сообщающихся сосудов/ легче /поскольку теплей/, чем столб газа вне печи /см. раздел 3.7.4/. Иными словами, восходящие горячие течения могут просто "вольнo" всплывать в среде произвольно опускающихся холодных газов /например, из-за порывов ветра/. Но нисходящие течения могут стать и упорядоченными /и подавить восходящие/ за счет "обратной тяги", когда нисходящий поток нагревается в топке от горящих дров и исходит не через трубу, а через дверцу топливника.

Указанные встречные вентиляционные течения можно формально рассматривать как суперпозицию многочисленных контуров циркуляционных "свободных" течений, которые в смежных точках взаимно компенсируют "зануляют" свои встречные течения. Так, в точке 3 течение в нижнем контуре компенсируется

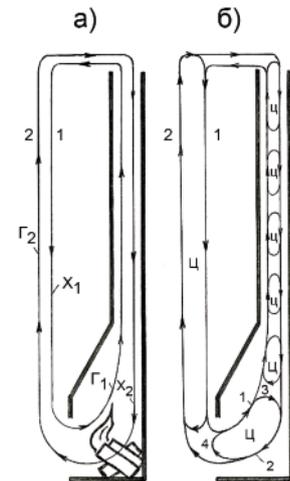


Рис.216. Вентиляционные /восходящие 1 и нисходящие 2/ и циркуляционные Ц течения. Г - горячий газ, X - холодный газ.

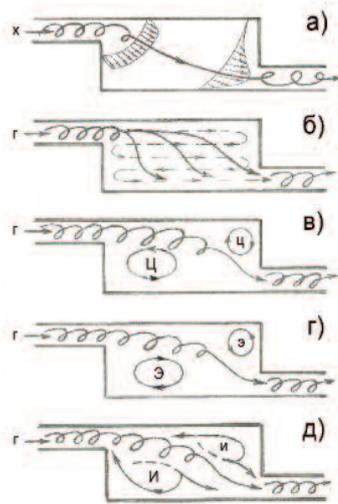


Рис.217. Виды течений в полости: а - турбулентный поток в канале становится ламинарным в полости, б - медленный горячий поток растекается по потолку и равномерно опускается по всему сечению "колпака" к выходному отверстию, в - ускоренный горячий поток, опускаясь преимущественно струей у правой стенки, создает в полости свободно-конвективную циркуляцию Ц за счет разных весов столбов газа в разных зонах полости, г - струя газа за счет вязкости увлекает за собой газ Э в полости /эжекция/, д - струя газа засасывает газ И из полости в области пониженных статических давлений около узких входных и выходных отверстий /инжекция/.

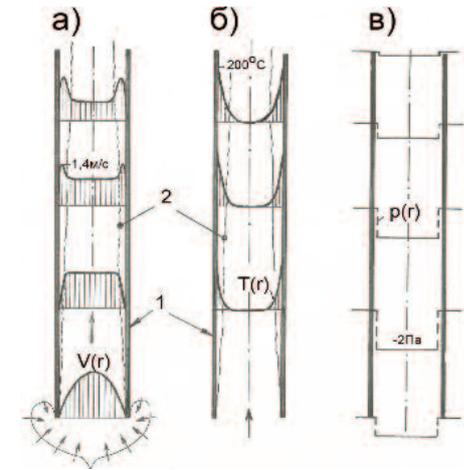
встречным течением в верхнем контуре, и два циркуляционных контура сливаются в один /рис.216-б/. По этому механизму все циркуляционные контуры могут преобразовываться в единый вентиляционный контур, замыкающийся вне печи. И, наоборот, вентиляционные траектории могут преобразовываться в циркуляционные контуры, если впереди появляется препятствие для вентиляционного потока /например, заужение/, когда каналы по сути превращаются в полости. Известно, что при закрытии задвижки на дымовой трубе в топке перед открытой дверкой могут появиться "клубы дыма" 4 /рис.216-б/.

Кроме турбулентностей и циркуляций к встречным движениям можно отнести также эжекционные и инжекционные течения /см. раздел 2.5.5/.

Для развития эжекционных течений необходимы изменения /градиенты/ скорости газов поперек течений /нужны проскальзывания слоев/, чтобы в полости возникли силы вязкости. Если циркуляционные течения могут течь встречно транзитному потоку на границе горячей струи /рис.217-в/, то эжекционные течения на границе потока всегда спутные и могут быть встречными только на стенках полости /рис.217-г/.

Отметим, что эжекционные течения могут создавать эффект тяги - засасывания газов /рис. 153/. В частности в горячей трубе возникает пристеночный конвективный поток нагревающегося газа, который увлекает за счет вязкости приосевые зоны холодного газа вверх /рис.218/. В результате, вследствие постоянства величины массового расхода газа по трубе, на входном /нижнем/ участке трубы появляется разрежение и поток холодного газа в трубу. Такой эжекционный механизм появления тяги отличен от традиционного механизма, обусловленного всплытием транзитного горячего газа в ограниченном пространстве трубы /рис.219/,

Рис.218. Компьютерный расчет механизма появления тяги в горячей трубе 500°C диаметром 50 мм и длиной 500 мм - нагревающийся и поднимающийся у горячих стенок трубы газ увлекает за собой за счет вязкости холодный приосевый газ / А.Г.Богаченков/.



тем, что горячий газ не заполняет все сечение трубы. Но ведь и при заполнении всей дымовой трубы горячим газом, у стенок всегда остаются пристеночные зоны холодных газов, которые увлекаются вверх именно вязкостью.

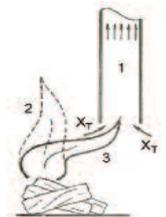
Для развития инжекционных течений в полости необходимы высокие линейные скорости в районе входных или выходных отверстий полости, чтобы разрежения там стали значительными /рис.217-д/.

4.5.3. Течения остывающих газов в каналах

Банальной особенностью печей является неуклонное охлаждение горячих дымовых газов вдоль по тракту конвективной системы. Это обусловлено тем, стенки печи изначально холоднее дымовых газов, и стенки нагреваются за счет охлаждения дымовых газов. Собственно, охлаждение дымовых газов и является основной задачей печи.

При охлаждении газ "сжимается" в том бытовом смысле, что уменьшается объем газа из-за повышения плотности газа ρ , хотя статическое давление при изобарическом охлаждении не повышается. Значит, в канальных печах с постоянным /неизменным/ проходным сечением каналов S линейная скорость V движения дымовых газов неуклонно снижается из-за сохранения массового расхода $G = \rho VS$ по тракту печи.

Рис.219. Если трубу 1 установить над пламенем 2, а потом трубу 1 сдвинуть вбок, то пламя 3 будет по-прежнему стремиться в трубу /эффект тяги/. Это объясняется тем, что горячий газ в трубе, поднимаясь, засасывает "как поршень" холодный газ через нижний срез трубы, а потоки холодного газа X_T в свою очередь увлекают за собой в трубу и потоки горячих горючих газов /пламена/.



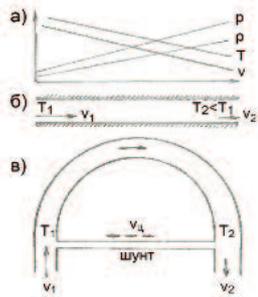


Рис.220. Снижение температуры $T_2 < T_1$ /при постоянстве проходного сечения канала S / приводит к снижению линейной скорости V , к повышению плотности газа ρ и статического давления p , что обнаруживается по появлению обратного /встречного/ потока в шунте /термоинжекция/.

Но если линейная скорость газа в канале постоянного проходного сечения неуклонно снижается, то, значит, неуклонно повышается статическое давление вдоль по тракту /рис.220/.

Действительно, само по себе охлаждение газа не обладает способностью к механическому воздействию, и торможение потока остывающего газа возможно лишь при возрастании статического давления.

Из уравнения Бернулли $p + \rho V^2/2 = p + GV/2S = p + G^2/2\rho S^2 = \text{const}$ следует, что при постоянстве массового расхода газов G статическое давление p в потоке “самопроизвольно” возрастает либо при расширении канала /то есть при увеличении проходного сечения канала S при постоянстве плотности газа ρ /, либо при снижении температуры T /то есть при увеличении плотности газа ρ при постоянстве проходного сечения S /.

Иными словами, охлаждение горячего газового потока в трубе постоянного сечения /рис.221-б/ газодинамически эквивалентно расширению холодного потока /рис.221-а/, поскольку при расширении потока линейная скорость потока тоже снижается. Это значит, что для обеспечения постоянства статического давления по тракту надо уменьшать проходное сечение охлаждающегося потока /рис.221-в/, то есть, в частности, делать каналы конвективной системы уже, чем топливник.

Указанные обстоятельства являлись не существенными при рассмотрении невязких газов, в которых статические

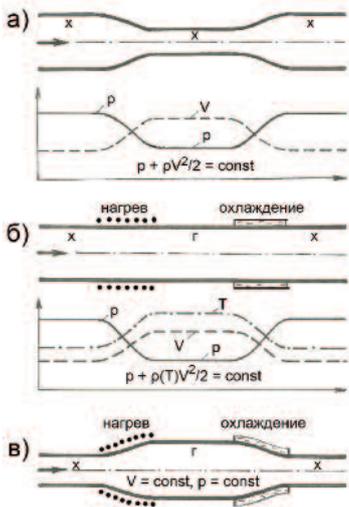
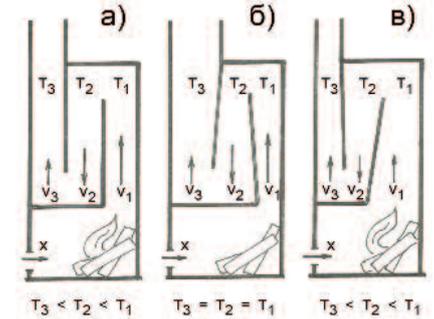


Рис.221. Сужение трубы для потока холодного газа (а) газодинамически эквивалентно нагреву газа в трубе постоянного проходного сечения (б). Для обеспечения постоянства статического давления нагре газу надо сопровождать расширением потока (в).

Рис.222. Канальная печь: а - обычная традиционная схема с каналами неизменного проходного сечения /максимальная скорость дымовых газов достигается в хайле/, б - схема с расширяющимися каналами, имитирующая схему (а) при продувке холодным газом, в - схема с сужающимися каналами /с постоянством динамического давления/.



давления восстанавливались при возвращении величин проходного сечения и температуры к исходным значениям. Но в реальных газах имеются необратимые потери давления Δp_f из-за турбулентности и вязкости, пропорциональные динамическому напору $\Delta p_f = \xi(\rho V^2/2)$. Так что уменьшение общего сопротивления печи требует обеспечения постоянства статического давления вдоль по тракту печи.

На практике это требование соблюдается далеко не всегда, и не только из-за недоучета потерь, но и из-за сложностей технического воплощения каналов с изменяемой геометрией. Так, в традиционной оборотной канальной печи максимальная скорость дымовых газов достигается в месте сужения потока в хайле /рис.222-а/. Это приводит в перегреву и растрескиванию кирпичной кладки в этом месте /из-за повышенной теплопередачи при высокой скорости горячего потока/, а также к неоправданным потерям давления из-за повышенных сопротивлений $\xi \rho V^2/2 = \xi GV/2S$. По сути, схема рис.222-а газодинамически эквивалентна холодному аналогу с расширяющимися каналами рис.222-б. Схема рис.222-а может быть газодинамически оптимизирована введением сужающихся каналов /рис.222-в/, обеспечивающих постоянство линейной скорости /или постоянство статических и динамических давлений/ остывающих дымовых газов вдоль по тракту печи. Графическая оценка по расчетным эпюрам давления показывает, что расширение хайла приводит к снижению сопротивления печи и к повышению разрежения в топливнике /рис.223/.

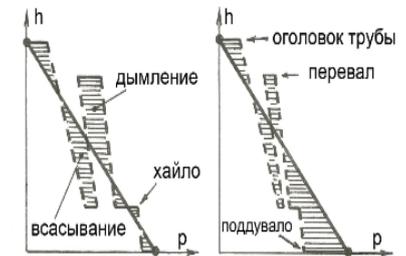


Рис.223. Эпюры статического давления: а - для традиционной схемы рис.222-а, б - для условно оптимизированной схемы рис.222-б.

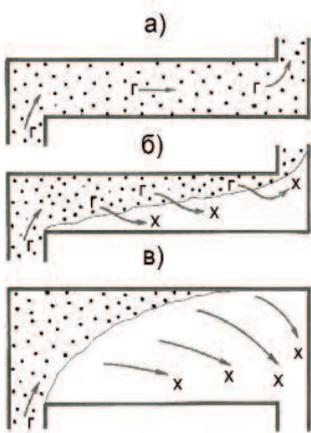


Рис.224. Медленные ламинарные течения: а - в горячем /теплоизолированном/ горизонтальном канале, б - в холодном /охлаждаемом/ горизонтальном канале, в - в холодном /охлаждаемом/ колпаке или перевале.

Охлаждение газа при течении в канале по-житейским представлениям может трактоваться как уменьшение количества газа или даже как “исчезновение” объема. Например, представим себе, что по трубе течет газообразный водяной пар, и вдруг на некотором участке водяной пар конденсируется - образуется вакуум, который и засасывает новые порции водяного пара из трубы. То есть, охлаждение газа, казалось бы,

должно производить действие всасывающего насоса и проявляться как некая тяга в канале в сторону более холодных зон потока /“в зону охлаждения”/.

Но такой подход справедлив только для нестационарных условий, например, когда герметичная канистра с воздухом, охлажденная на морозе, при открытии крышки хлопком всасывает внешний воздух, поскольку в ней при охлаждении воздуха образовалось пониженное давление. Мы же рассматривали стационарный режим, то есть те процессы, которые произошли бы в канистре после первичного всасывания в условиях, но когда “всасывание” надо было бы продолжать бесконечно долго. В таком случае пришлось бы устанавливать не просто систему постоянного охлаждения, но и насос для откачки газа и продолжения всасывания. Но мы в печи никаких насосов не имеем. Поэтому и картина течения оказывается кардинально иной, нежели в момент открытия охлажденной канистры.

При течении в горизонтальном охлаждаемом канале объемы остывающего газа стремятся стекать струями в нижнюю придонную часть канала. При турбулентном течении хаотические вихри все смешивают в канале и выравнивают температуру газа по сечению канала. Но при ламинарном течении неизбежно возникает высотное расслоение газа по температурам с образованием припотолочного слоя горячего газа /рис.224-б/. Вместо обычной самотяги канала /как полностью заполненной горячим газом полости/ появляется абсолютно иной эффект в виде напора “реки горячего газа” на потолке, когда утоньшающийся /за счет охлаждения/ слой горячего газа растекается по потолку “как вода под уклон” /см. рис.174/. Этот напор не зависит от величины самотяги трубы, аналогичен напору водоводного течения и символизирует переход канала в “режим колпака” /рис.224-в/.

4.5.4. Течения остывающих газов в полостях

В ламинарных полостях /колпаках/ горячие газы тоже стремятся самопроизвольно всплыть вверх к потолку /перекрыше/, затем, накапливаясь на потолке “горкой” /по гидравлической аналогии рис.106/, растекаются по потолку, охлаждаются и “пропадают” - превращаются в холодные газы, которые опускаются /вернее, вытесняются/ вниз.

Горячие течения дымовых газов и в настоящем разделе могут быть и “водоводными”, и “водопроводными”. Но сама гидравлическая модель для случаев остывающих газов не вполне удачна, так как горячие газы, охлаждаясь, превращаются в холодные /то есть по гидравлической аналогии вода сама по себе как-бы куда-то исчезает, например, быстро “испаряется”/. Так что термины “водоводные” и “водопроводные” тоже весьма условны.

Особо отметим, что при высоких линейных скоростях перемещения /при наличии достаточно большого импульса движения/ горячие потоки могут двигаться по инерции вопреки “естественному” стремлению всплыть вверх. При этом горячие потоки могут “проскакивать” мимо колпаков, закручиваться, поворачивать в любом направлении, в том числе и с движением вниз. Инерционные движения зависят исключительно от конструктивных особенностей конкретной схемы аппарата, поэтому здесь рассматриваться не будут.

Простейший случай подобных течений - потоки газов в курной избе /рис.163/. Известно, что курные помещения представляли собой первые древние печи, у которых топливником служило само отапливаемое помещение - пещера, нора, яма, землянка [108-111]. Курные помещения являются также и прототипом горнила духовых сводовых печей.

При слабом огне /то есть при малых мощностях теплового источника/ горячие дымовые газы, поднимаясь и растекаясь вдоль по потолку, быстро охлаждаются. Известно, что в большом высоком холодном /например, замороженном/ поме-

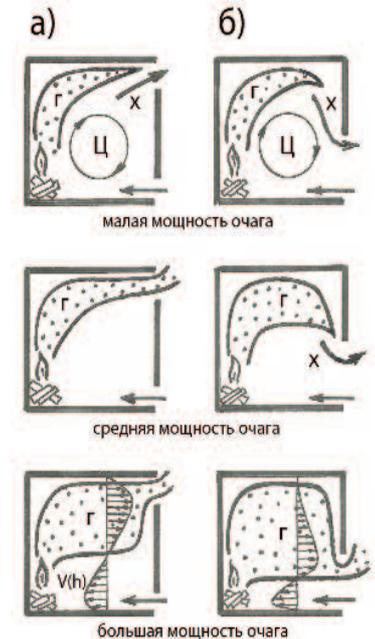


Рис.225. Течения горячего дыма в курной избе при разных степенях разгорания дров в очаге /каменке/: а - с выпуском дыма в верхнее выпускное отверстие /дымник/, б - с выпуском дыма в дверь.

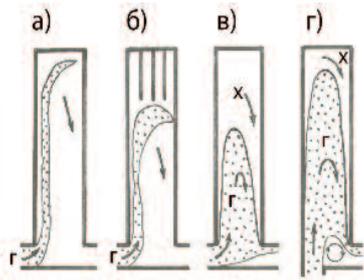


Рис.226. “Водоводные” течения горячего газа в колпаках: а - при малом расходе горячего газа /струйка сигаретного дыма в опрокинутом стакане/, б - затрудненность входа горячего газа в узкие зазоры /колпачки/ наверху колпака, в - при большом расходе горячий газ не успевает входить в колпак, г - подача горячего газа с разгоном вверх. Обозначения: г - горячий газ, х - охладившийся газ.

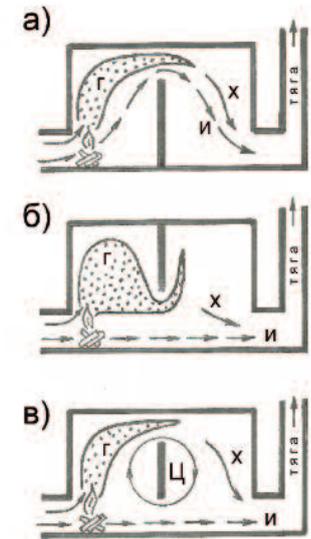
щении все тепло от маломощной электроплитки уходит “куда-то” вверх и назад не возвращается. Так что картина горячих течений не сильно изменяется при переносе вытяжного отверстия /дымника/ с потолка /рис.225-а/ в проем двери /рис.225-б/, то есть при переходе от проточной полости к тупиковому колпаку.

При увеличении мощности теплового источника /или, что одно и то же, при утеплении стен помещения/ все тепло уже не успевает /или не может/ поглотиться потолком помещения. При организации выпуска дыма через потолочное отверстие нагревается лишь потолок, а при выпуске через проем двери прогреваются и верхние части стен. Здесь уже начинает в какой-то степени выполняться гидравлическая аналогия, поскольку первично горячий газ в какой-то степени начинает покидать помещение в горячем состоянии.

И наконец, при большой мощности теплового источника горячий дымовой газ уже не в состоянии “свободно” вытечь через потолочное вытяжное отверстие, накапливается в виде припотолочного горячего слоя /“пирога” по банной терминологии или “мешка” по терминологии В.Е.Грум-Гржимайло/, что создает напор в вытяжном отверстии и приводит к увеличению расхода горячего газа через отверстие и к возможности удалять все возникающие при горении дымовые газы. Если же даже и при наличии избыточного давления у потолка горячие газы “не успевают” выйти через потолочное отверстие /дымник/, то они начинают вынужденно выходить через верх дверного проема. То есть, при уменьшении проходного сечения потолочного вытяжного отверстия горячие дымовые газы все больше заполняют помещение “теплом” сверху вниз.

Аналогично обстоит дело и в печных колпаках, расположенных внутри печи в виде вертикальных тупиковых ответвлений в печных каналах /рис.226/. Так при малых скоростях подачи горячие газы подобно “дымку от сигареты” поднимаются вверх к потолку и опускаются только охладившись /рис.226-а/. Но по мере увеличения расхода горячий газ все в

Рис.227. Течения “водопроводного типа” под действием тяги трубы: а - в проточных полостях, б - в тупиковых колпаках, в - в проточном колпаке, г - горячие дымовые газы, х - охладившиеся дымовые газы, и - “избыточный” воздух, не нагретый от пламени.



большей степени заполняет объем колпака, что затрудняет подъем новых порций горячих газов в колпак из-за снижения величины сил Архимеда. Еще большие затруднения могут вызвать силы вязкости, в наибольшей степени проявляющиеся в узких высоких колпаках. Ведь возвращающиеся сверху охлажденные газы препятствуют входу в колпак снизу “свежих” горячих газов.

Так что, расхожее среди части печников утверждение о том, что печные колпаки могут иметь произвольную форму /без снижения эффективности отбора тепла/, не соответствует действительности. Так, если колпак наверху разбить еще на множество узких колпачков /рис.226-б/, то доступ тепла к потолку может совсем прекратиться из-за устранения доступа горячего газа к потолку. Это известное явление /“огонь в пещеру не идет”/ лежит в основе утепляющих свойств меха животных /рис.226-в/. Для заполнения колпака горячим газом приходится вводить порой горячий газ энергично с большой скоростью снизу вверх, чтобы силами инерции “пробить колпак” доверху /рис.226-г/. Не выдерживает критики и другое расхожее утверждение, что колпак имеет большую эффективность отбора тепла по той причине, что горячие газы, мол, долго “крутятся” в колпаке, не имея возможности выйти, не охладившись. Но ведь если горячий газ долго “крутится” там, то, значит, и “свежий” горячий газ долго не может войти туда.

В реальных печных колпаках максимум температур газов может достигаться не на потолке /перекрыше/, а в центральных

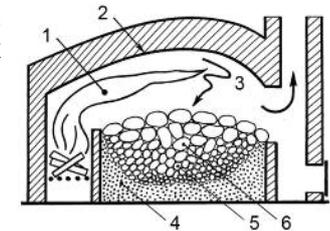


Рис.228. Схема пламенной отражательной печи: 1 - пламя, 2 - раскаленный свод, 3 - тепловое излучение со свода, 4 - ложе ванны для теплоизоляции. 5 - шихта кусковая, 6 - нагретая шихта.

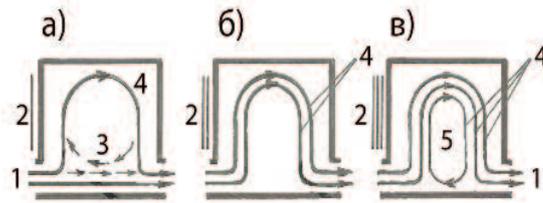


Рис.229. Траектории ламинарного течения газов в локально обогреваемом колпаке: а - слабый нагрев, б - средний нагрев, в - сильный нагрев. 1 - транзитный поток, 2 - нагреватель стенки /мощность указана числом линий/, 3 - циркуляционный поток, 4 - результирующий поток.

зонах колпака [112]. То есть колпак становится средством предотвращения перегрева перекрыши. Так, максимальная температура чугунных варочных настилов достигается в дровяных кухонных плитах именно при облизывании настила языком пламени, то есть в режиме полнопроточной полости /рис.227-а/, а не в режиме тупикового колпака /рис.227-б/. При "объединении" колпаков с помощью верхнего соединительного отверстия образуется "растянутый" колпак, который начинает проявлять себя как проточная полость /как расширенный вверх участок канала/, в которой транзитный поток захватывает и припотолочные зоны /рис.227-в/.

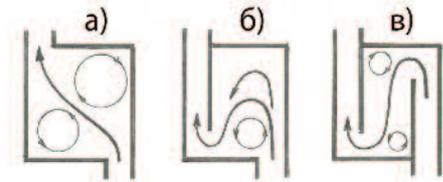
Мелкие /не глубокие/ колпаки характерны для технологических пламенных "отражательных" печей, в которых, как считал В.Е.Грум-Гржимайло, под сводом образуется "мешок горячих газов", постепенно догорающих за счет высоких температур /рис.228/.

Однако, для догорания горючих газов необходимы не только высокие температуры, но и кислород, так что подъем в колпак "горячих горящих горючих" газов должен сопровождаться подъемом и некоторого количества "избыточного" воздуха для обеспечения горения и предотвращения дымления пламени /см. раздел 5/. Но избыточный воздух не имеет высокой температуры и в колпак самостоятельно попасть не может.

Поэтому концепция "мешка горячих газов" применительно к топливникам бытовых печей должна домысливаться в плане обеспечения подачи воздуха в "мешок" /колпак/, например, методами динамического продува для обеспечения бездымного сгорания.

Течение газов в колпаке можно пояснить на модели колпака с нагреваемой левой боковой стенкой, имитирующей нагревательное действие пламени /рис.229/. Предположим, что расход горизонтально поступающего слева холодного газа 1 фиксирован - постоянен по времени и неизменен по величине /"двухлинейный" расход/. Если мощность нагрева стенки незначительна, то мала и циркуляционная конвекция - например, "однолинейная" /рис.229-а/. В таком случае, циркуляционный поток 3 "зануляет" одну линию поступающего холодного потока 1 с образованием "однолинейной" транзитной траектории 4 внутри колпака.

Рис.230. Виды полостей: а - полнопроточная полость, б - колпак, в - оборотный канал с расширением.



Если же мощность нагрева стенки увеличить до "двухлинейного" уровня циркуляционной конвекции, то в канале "занулятся" обе линии поступающего холодного потока 1 /рис.229-б/. То есть в этом случае весь входящий холодный воздух 1 нагревается и устремляется к потолку, а потом, охлаждаясь, возвращается в канал. При еще большем нагреве, обеспечивающем "трехлинейный" уровень циркуляционной конвекции, в колпаке возникнет результирующий поток 4, складывающийся из сквозного транзитного потока 1 и встречного циркуляционного потока 5 /рис.229-в/.

Изменение траектории от прямолинейной 1 к результирующей кривой 4 иногда формально воспринимают как факт того, что сопротивление колпака меньше сопротивления прямого канала /рис.229/. Ясно, что подобное искривление траектории обусловлено ускорением /увлечением/ газа вверх при его нагреве на горячей стенке колпака. Но ведь потом газ из колпака неминуемо возвращается в канал, перегораживая его и увеличивая его сопротивление. Так что факт подъема газа в колпак может рассматриваться и как факт повышения сопротивления канала при обустройстве над ним колпака [6].

Схема на рис.229 основана на факте нагрева холодного газа в колпаке и не применима к конвективным системам печей, где происходит, наоборот, охлаждение горячего газа в холодном колпаке /рис.226/. Охлаждение восходящего горячего газа в колпаке сопровождается "проседанием" /торможением/ всплывающего горячего газа.

Тем не менее, поток горячего газа, движущийся по горизонтальному каналу, попадая в холодный колпак, претерпевает вертикальное /боковое/ воздействие сил Архимеда и вынужден искривлять траекторию вверх /рис.226-в/. А затем рано или поздно газ из колпака возвращается в канал и перегораживает его. Так что в реальности колпак повышает сопротивление прямого горизонтального канала. К сожалению, мы не располагаем численными данными по сопротивлениям колпаков горячим потокам. Однако, ясно, что раз колпаки и каналы конструктивно образуются путем рассечения полнопроточной полости стенками, то сопротивление каналов /рис.230-в/ и колпаков /рис.230-б/ в любом случае больше по величине, чем сопротивление полости /рис.230-а/.