

3. Движение горячих газов

В предыдущем разделе были рассмотрены особенности движения изотермического газа на модели течений однородной жидкости.

В этом же разделе будут рассматриваться движения в среде неизотермического /пространственно неоднородно нагретого/ вязкого газа. Особенностью неизотермического газа является наличие нагретых объемов /горячих пространственных зон/ с пониженной плотностью, самопроизвольно всплывающих под действием архимедовых подъемных сил и образующих самопроизвольные течения газа.

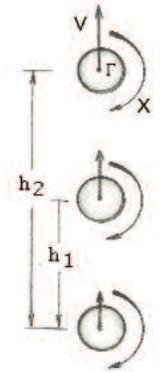
Следует подчеркнуть, что газ приходит в самопроизвольное движение только при непосредственном контакте /соприкосновении/ нагретых и не нагретых газов, то есть при отсутствии разделительных стенок. Если же газ отгорожен и всюду нагрет равномерно, то и плотности газа всюду одинаковы, и самопроизвольные всплытия становятся невозможными. Однородно нагретый газ ведет “внутри себя” также, как однородный не нагретый газ, и сопоставительные понятия “холодный” и “горячий” теряют свой смысл. Эти факты бывают порой на удивление далеко не очевидными для “житейского разума”.

3.1. Подъемная сила

При нагреве газ расширяется, и его плотность снижается с величины ρ_X до меньшей величины $\rho_G = \rho_X T_X / T_G$, где T_X - абсолютная температура (в $^{\circ}K$) холодного газа /до нагрева/ и T_G - абсолютная температура горячего газа /после нагрева/. Становясь малым по весу /легким/, локально нагретый объем газа стремится самопроизвольно всплыть /вытолкнуться вверх/ в окружении ненагретого газа под действием подъемной силы Архимеда /см. раздел 2.3/. А локально охлажденный объем газа стремится самопроизвольно утонуть /вытолкнуться вниз/ в окружении теплого газа. Возникают взаимно противоположные перемещения /течения/ горячих и холодных объемов газа.

Согласно гидравлической аналогии /именно аналогии явления, а не согласно численному подобию/, всплывающий объем горячего газа

Рис.160. Гидравлическая модель сферического объема горячего газа, всплывающего под действием подъемных сил в среде холодного газа: Г - горячий газ, X - холодный газ, V - скорость, h - высота подъема.

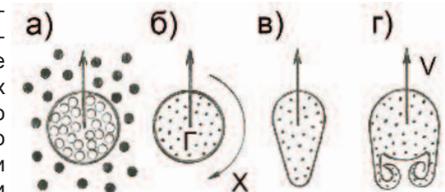


часто рассматривают условно /с точностью “до наоборот”/ как каплю жидкости, падающую /свободно ускоряющуюся вниз/ в воздухе под действием сил тяготения /рис.101/. Локальный объем горячего газа Г, всплывая, “раздвигает” окружающий холодный газ и направляет его из лобовой части в тыльную по стрелке X /рис.160/.

При отсутствии вязкости эти перегородки холодного газа не испытывают сопротивления, и локальный объем газа Г свободно ускоряется вверх под действием подъемной силы Архимеда $g(\rho_X - \rho_G) = g\Delta\rho$, рассчитанной на единицу объема /см. стр.89/. Чем больше объем горячего газа, тем больше подъемная сила, но тем больше и масса объема горячего газа. В результате, ускорение объема горячего газа вверх $\Delta\rho g / \rho_G$ не зависит от величины его объема. Поэтому, объем горячего газа можно формально разбить на неограниченное количество микрообъемов, изображаемых условно маленькими белыми кружочками /рис.161-а/ или даже точками /рис.161-б/. Причем все эти микрообъемы в отсутствии вязкости будут ускоряться с одинаковыми ускорениями $g\Delta\rho / \rho_G$, не изменяя форму исходного составного объема /шара-сферы в случае рис.160/.

При наличии же вязкости, объем самопроизвольно всплывающего горячего газа будет испытывать силу сопротивления трения окружающего холодного газа. При сферической форме объема всплывающего горячего газа эта сила сопротивления трения по формуле Стокса равна $F = 3\pi\mu Vd$, где $\pi = 3,14$ - безразмерное число Пифагора, μ - коэффициент динамической вязкости, V - скорость движения объема горячего газа, d - диаметр сферического объема горячего газа /см.стр.120/. Поэтому объем горячего газа будет ускоряться вверх лишь до достиже-

Рис.161. Всплытие объема горячего воздуха Г в окружении холодного газа X: а, б - при отсутствии вязкости форма объема не меняется /при одновременном “старте” всех частей объема/, холодный газ X ламинарно перетекает из лобовой части всплывающего объема в тыльную, в - при наличии вязкости /трения обтекания/, г - при возникновении турбулентности при большой скорости V.



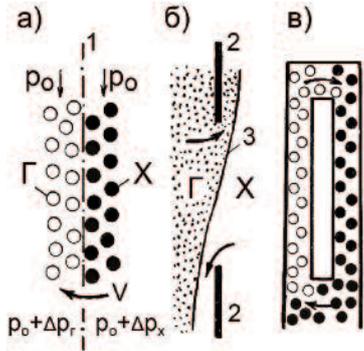


Рис.162. Холодный газ “подлезает” под объем горячего газа: а - под объемом горячего газа Г (белые кружочки) располагается зона пониженного статического давления ($p_0 + \Delta p_\Gamma < (p_0 + \Delta p_X)$), куда и устремляется окружающий холодный газ X (черные кружочки) по стрелке V, б - в отверстии “форточке” горячий газ Г /область с точками/ устремляется вверх в зону холодного газа X, в - пояснение вышеуказанных явлений с помощью гидравлической модели сообщающихся сосудов с разными весами колен. 1 - умозрительная /воображаемая/ линия разделения горячего и холодного газов, 2 - реальная разделительная стенка с “форточкой”, 3 - умозрительная линия разделения потоков горячего и холодного газов.

ния величины скорости подъема $V = (2g\Delta\rho h_{кр}/\rho_\Gamma)^{0,5}$, равной величине скорости витания $V_{вит} = 0,056d^2g\Delta\rho/\mu$, когда подъемная сила $0,167\pi d^3g\Delta\rho$ сравнивается с силой сопротивления трения $3\pi\mu Vd$.

Численные оценки свидетельствуют, что при характерных температурах горячего газа $T_\Gamma = (100 - 1000)^\circ\text{C}$ силы трения /вязкости/ не существенны при обычных поперечных размерах объемов всплывающих горячих дымовых газов более $d > (10^{-3} - 10^{-2})$ м.

В то же время численный анализ показывает, что явления турбулентности проявляются при $T_\Gamma = (100 - 1000)^\circ\text{C}$ как раз при значительных размерах объемов горячего газа $d > (10^{-3} - 10^{-2})$ м, соответствующих числам Рейнольдса $Re = \rho Vd/\mu > 40$ /см.стр.119/.

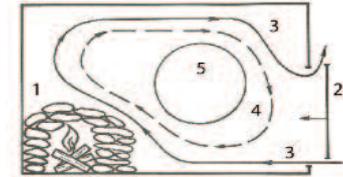
Таким образом, малые одиночные объемы горячих газов с характерным поперечным размером 0,001м и менее, всплывая, разрушаются за счет трения /рис.161-в/. А большие одиночные объемы горячих газов с характерным “печным” поперечным размером 0,1м и более, всплывая, разрушаются за счет турбулентности, похожей на облако ядерного взрыва /рис.161-г, а также см. рис.121/. Действительно, дым из трубы, истекающий в неподвижный воздух, турбулизируется. А дымок от потухшей свечи, хоть и имеет извилистую траекторию, ламинарен.

3.2. Природа течений горячего газа

В печной практике имеют дело не с одиночными отдельными объемами горячего газа, а с непрерывными потоками горячего газа.

Причиной возникновения самопроизвольных течений в среде неизолированного газа является не просто сама по себе легкость отдельно-

Рис.163. Естественная /гравитационная/ вентиляция и циркуляция на примере черной бани: 1 - каменка, 2 - дверь, 3 - вентиляционная траектория потоков, 4 - циркуляционная траектория потоков, 5 - застойная зона, 6 - имитация каменки /горящих дров/ неким подовым нагревателем, 7 - имитация каменки неким настенным нагревателем.



го локального объема нагретого газа, а наличие перепадов статического давления в разных точках пространства на одном высотном уровне /рис 162-а/. Эти перепады статического давления обусловлены разным весом столбов газа над различными точками среды. Так, под нагретым объемом газа располагается зона пониженного давления, в которую устремляются, если не препятствуют стенки, горизонтальные потоки холодного газа, выталкивающие нагретый объем газа вверх /модель метеоциклона/.

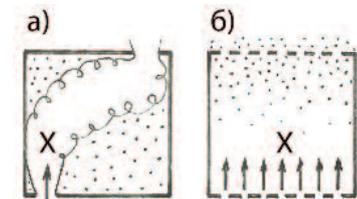
Такая модель позволяет объяснить причину всплытия объема горячего газа, не окруженного со всех сторон холодным газом, а только контактирующего сбоку с объемом холодного газа. Фактически речь идет о разных весах столбов газа, образующих колена сообщающихся сосудов /рис.162-в/. Тем самым может быть пояснен механизм самопроизвольного подтекания холодного воздуха под самовсплывающие горячие дымовые газы в кострах и русских печах.

3.3. Гравитационная конвекция

В дальнейшем при описании движений газа внутри объема неизолированного газа будем использовать понятие конвекции.

Конвекцией называется явление /факт/ непрерывного перемещения вещества в пространстве физически неоднородного газа. Понятие конвекции является более узким понятием, чем понятие “движений-перемещений объемов /масс/ газа вообще”, поскольку подразумевает, что движение развивается в неоднородном газе и сопровождается переносом

Рис.164. Типы схем принудительной приточной вентиляции помещений: а - схема смешения с подачей турбулентной струи свежего воздуха X с неизбежным образованием сквозняков и застойных зон, б - схема вытеснения с ламинарным подтеканием фронта свежего воздуха через перфорированную стенку /пористую, волокнистую/.



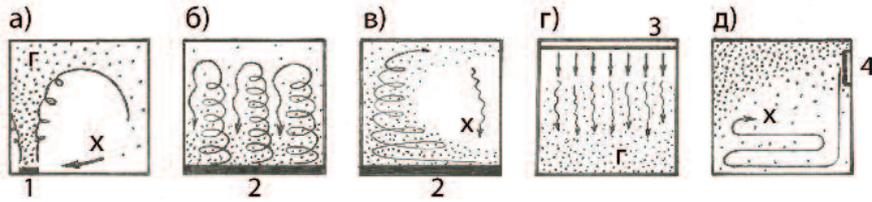


Рис. 165. Структура гравитационной конвекции в замкнутом помещении: а - развитие восходящей конвективной струи над локальным источником тепла 1 ведет к образованию в помещении единого моноциркуляционного контура с подсосом холодного воздуха в основании конвективной струи, б - восходящий фронт теплого воздуха от горячего пола 2 разбивается на многочисленные восходящие струйки и многочисленные нисходящие струйки выталкиваемого сверху холодного воздуха, что создает многоячеистую структуру конвекции, в - многоячеистая структура конвекции является динамически неустойчивой и может самопроизвольно трансформироваться в единую моноциркуляционную траекторию, г - нисходящие потоки воздуха, охлаждаемого у холодного потолка 3, создают многоячеистую структуру конвекции, д - многоячеистая конвекция неустойчива, при локальных переохлаждениях 4 переходит в моноциркуляционную конвекцию.

сом /перемещением/ локальных параметров газа /плотности, температуры, химического состава и т.п./ из одних пространственных зон в другие. Так, например, "конвективный теплоперенос" в отличие от "диффузионного теплопереноса" /молекулярной теплопроводности/ происходит только в подвижном воздухе. В однородном газе физические параметры газа всюду одинаковы, и смещения объемов не влекут за собой изменения пространственного распределения параметров газа.

Конвекция подразделяется на естественную /свободную/ и вынужденную /принудительную/. Естественная конвекция возникает самопроизвольно при пространственно неравномерном нагревании газа в поле тяготения. То есть естественная конвекция имеет чисто гравитационную природу. Вынужденная (принудительная) конвекция возникает под действием каких-либо внешних механических воздействий, то есть с помощью воздуходувок, компрессоров, вентиляторов, вееров.

В этой книге рассматривается только естественная конвекция, поскольку в бытовых дровяных печах дымососы /принудительная вытяжка/ и воздухонагнетатели /принудительное дутье/ не используются. Естественная конвекция известна печникам также под названием "вольного движения воздуха" [60, 95-98], впервые введенным М.В.Ломоносовым [99].

Естественную /вольную, свободную, гравитационную/ конвекцию будем в дальнейшем называть для краткости просто "конвекцией".

3.4. Пространственный контур конвекции

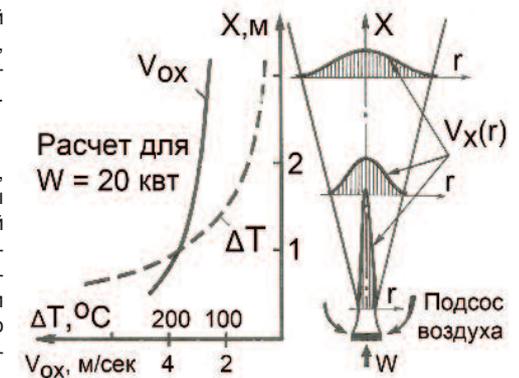
Под контуром конвекции будем понимать пространственную траекторию газовых потоков. В замкнутом пространстве /например, в помещении с закрытыми дверями 2/ имеет место циркуляционный контур конвекции - замкнутые траектории течений газа 4 /рис.163/. В незамкнутом /в частично ограниченном/ пространстве имеет место также и вентиляционный контур конвекции - незамкнутые /разомкнутые/ траектории течений газа 3. Ясно, что "незамкнутые" траектории все же замыкаются где-то вдали "на бесконечности" /например, выходя из помещения и вновь возвращаясь/. В силу закона сохранения соблюдается принцип - откуда уходит, туда одновременно столько же и приходит, причем рано или поздно придет то, что только что ушло.

Чем больше пространственная протяженность контура конвекции, тем сильнее может быть выражены последствия конвекции, поскольку конвективные потоки переносят "климатические условия" на большие расстояния. Так, погоду в Восточной Европе определяют ветры из далекой Атлантики. Кстати, и турбулентности /в том числе и атмосферные циклоны/ - это тоже конвекция со своим контуром циркуляции, причем крупномасштабные турбулентности имеют более существенные последствия, чем мелкомасштабные.

Циркуляция осуществляется внутри помещения и имеет не столь протяженный контур, как вентиляция. Последствия циркуляции менее существенны, чем последствия вентиляции. Вентиляция приносит в помещение воздух издалека - из воздушной атмосферы /рис.163/. И

Рис. 166. Структура нестесненной гравитационной конвективной струи, создающейся над локальным источником тепла мощностью 20 кВт. Расчетные формулы:

$\Delta T(^{\circ}C) = 24,5[W^2(кВт)/x^5(м)]^{0,33}$,
 $V_{ox}(м/сек) = 1,33[W(кВт)/x(м)]^{0,33}$,
 где ΔT - превышение температуры воздуха в струе над температурой подсосываемого из помещения воздуха, $V_x(r)$ - продольная /аксиальная/ составляющая скорости, в том числе $V_{ox} = V_x(r=0)$ непосредственно на оси турбулентной струи в неограниченном пространстве [70].



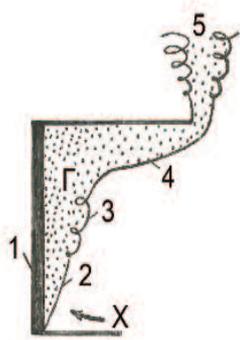


Рис.167. Гравитационная конвекция в полуограниченном пространстве: 1 - горячая стенка, 2 - ламинарный участок конвективного потока, 3 - турбулентный /струйный/ участок конвективного потока, 4 - конвективный поток горячего газа, растекающийся по потолку, 5 - нестесненная струя горячего газа.

этот вентиляционный воздух может кардинально отличаться от “воздуха” /дымовых газов/ в черной бане. Поэтому именно вентиляция поставляет кислород на горение дров в печи. Черная баня - это по-существу деревянная дровяная топка /типа курной сводовой русской печи/.

Последствия конвекции определяются и способами организации вентиляции и циркуляции. Так, различают смешительную /струйную со сквозняками и застойными зонами/ и вытеснительную /фронтальную/ вентиляцию /рис.164/. Качество смешительной вентиляции определяется условиями смешения, то есть по сути формируется циркуляцией /в том числе, в плане обтекания воздухонаправляющих препятствий/. Вытеснительная же вентиляция исключает возможность циркуляции.

Циркуляция, в принципе, тоже несет в себе некие “смесительные и вытеснительные” признаки. Так, ламинарный восходящий поток теплового воздуха от горячего пола /или нисходящий поток охлажденного воздуха у холодного потолка/ неизбежно разбивается в замкнутом пространстве на множество микроциркуляционных /“турбулентных смесительных”/ ячеек из-за необходимости пропускать встречные потоки воздуха. Но и микроячейная структура циркуляционной конвекции является динамически неустойчивой и может самопроизвольно трансформироваться из-за вязкости в “вытеснительную” циркуляцию со струйным моноциркуляционным контуром /рис.165/.

3.5. Конвективные струи

Конвективные течения /потоки/ самопроизвольно ускоряются вверх и стремятся превратиться в струи /в струйные течения/.

Струей называют поток вещества, перемещающегося в окружающей среде в определенном направлении на расстояния многих своих поперечных размеров [100 -102]. Основным параметром струи - вектор количества движения, указывающий направление импульса и скоростной напор ρV^2 . Понятие струй введено математиками, заинтересовавшимися автомодельностью скоростных турбулентных истечений - струя

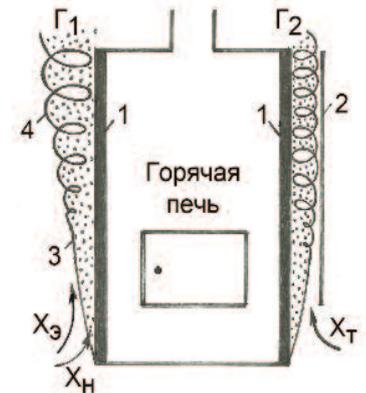
забывает свою предисторию, то есть откуда /из квадратного, треугольного или круглого отверстия/ истекает в турбулентном режиме.

“Обычные” ламинарные неструйные течения /например, потоки в трубе/ - это течения с плавно меняющимися скоростными параметрами, с вязким пограничным слоем, касающимся стенок /рис.131/. А напорные турбулентные струи - это “разрывные” течения с выраженными /как-бы “слабовязкими”/ пространственными границами /с граничными поверхностями перепада продольной поступательной скорости/, на которых статическое давление газа постоянно по величине /рис. 148/.

Напорная изотермическая струя газа формируется “струей-источником” /из сопла/, обладающей достаточно большим начальным количеством движения. Дальнобойность такой струи равна шести калибрам $6d_0$ /см. раздел 2.5.5/. Если же струя горячая и направлена вверх, то ее дальнобойность увеличивается в $(T_r/T_x)^{0.5}$ раз, где T_r и T_x - абсолютные в $^{\circ}K$ температуры горячей струи и холодной среды. То есть горячая струя с температурой $900^{\circ}C$ в среде с температурой $20^{\circ}C$ имеет длину в два раза большую, чем изотермическая струя, и ее дальнобойность за счет архимедова всплытия повышается до 12 калибров [70].

Безнапорная же неизотермическая чисто конвективная струя от горизонтального источника тепла ограниченной площади /типа комфорки кухонной электроплиты/ “набирает” тепло быстро /“мгновенно”/ и затем “отрывается” от источника тепла и устремляется “свободно” вверх. Структура такой свободной /в смысле абсолютно не стесненной стенками/ конвективной струи над локальным источником тепла зависит только от мощности теплового источника W и в области турбулентной автомодельности не зависит от его площади /рис. 166/. Такая струя по

Рис.168. Гравитационная конвекция около нагретой стенки печи. Слева - полустесненная гравитационная конвекция в полуограниченном пространстве. Справа - стесненная гравитационная конвекция в ограниченном пространстве зазора между стенкой печи и экраном. 1 - горячие стенки печи, 2 - экран /кожух/ печи, 3 - ламинарный участок конвективного потока, 4 - турбулентный участок конвективного потока, Γ_1 - горячий конвективный поток в полуограниченном пространстве, Γ_2 - горячий конвективный поток в ограниченном пространстве, X_H - поток холодного воздуха, идущий на нагрев стенкой, X_3 - поток холодного воздуха, эжектируемый горячим потоком /увлекаемый трением/, X_T - поток холодного воздуха, всасываемый тягой трубы.



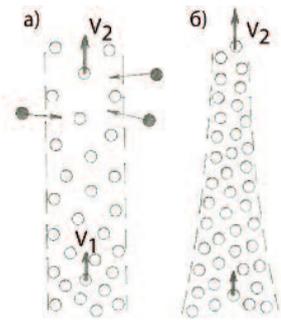


Рис.169. Струю горячего газа, восходящую в холодном газе, можно условно представить как поток микрообъемов горячего газа /белые кружочки/, всплывающих в среде холодного газа /черные кружочки/. При ускорении горячих микрообъемов в струе создается разрежение (а), устраняя которое, внешние холодные микрообъемы устремляются к оси и сжимают восходящую горячую струю (б).

мере подъема теряет свою линейную скорость и температуру за счет смешения с массами окружающего воздуха.

Безнапорный же неизотермический чисто конвективный поток, формируемый у горячей /теплой, нагретой/ вертикальной стены /поз.2 на рис. 167 или поз.Г₁ на рис.168/ и не имеющей начальной линейной скорости, накапливает свое количество движения постепенно по мере нагрева от поверхностей и по мере архимедова всплытия /за счет перехода потенциальной энергии в кинетическую/. Характеристики такого потока определяются скоростью нагрева, и при определенных условиях теплообмена /см. раздел 4.4/ между горячей стеной и холодным воздухом конвективный поток может разогнаться в струю, в том числе турбулентную. Много зависит также и от ограниченности /стесненности/ струи возможными стенками /поз.Г₂ на рис.168/, которые не допускают разбавления струи внешним холодным воздухом.

В любом случае, конвективные потоки являются как-бы “затопленными” течениями газа в смысле их распространения в плотной среде, которую надо “пробить” своим скоростным напором, то есть в форме струи воды в воде, а не в форме струи воды в воздухе.

Представляя восходящую струю горячего газа как совокупность всплывающих горячих “воздушных шариков”, нетрудно сообразить, что при разгоне газа расстояния между “шариками” увеличиваются, а значит в струе падает статическое давление $p = \rho kT$ /рис.169-а/. Микрообъемы внешнего холодного газа устремляются в эту зону разрежения /пониженного давления струи/ и предотвращают создание значительных разрежений /перепадов давления/. Тем самым и достигается вышеуказанное условие равенства статического давления на граничных поверхностях струи. При этом сама струя неизбежно сужается в силу сохранения потока массы /рис.169-б/. Эта разгонная ламинарная часть струи обозначена на рис.166 как зона “подсоса воздуха”. Далее, по мере увеличения скорости подъема, струя турбулизируется и приобретает форму расширяющегося конуса /турбулентного следа/.

Строго говоря, затопленными газовыми потокам в математических моделях называют потоки, истекающие в безграничное пространство, заполненное абсолютно неподвижным газом с абсолютно теми же физическими свойствами, что и газ в самом рассматриваемом потоке. Это пространство называют затопленным или неподвижным. Если поток истекает в поток /то есть в движущийся газ/, то потоки называют спутными, встречными или ориентированными /под углом друг к другу/. А если поток истекает в неограниченное пространство, заполненное газом других физических свойств /например, струя воды в воздухе/, то такие потоки называют “свободными” [67]. Так что поток дымового газа в “неподвижный” дымовой газ колпака является “затопленным”, а поток горячего дымового газа, истекающий в поток холодного воздуха, является “свободным”, а не затопленным. А несвободными потоками называют потоки, вытекающие в полуограниченное или ограниченное /стесненное/ пространство газа иных физических свойств, например, настильные потоки горячего воздуха /под или над поверхностями/ в холодный воздух /завесы/ или струи воздуха, истекающие в дымовой канал, в том числе в топку печей.

Все это влечет за собой порой невероятную терминологическую путаницу. Переход от термина “вольное движение газов” к “свободной” /но полуограниченной/ конвекции от нагретой стены приводит к дополнительным недоразумениям. Поэтому приведем некоторые расхожие варианты терминологии “свободных” течений:

- свободное всплытие горячего газа в смысле самопроизвольного и беспрепятственного подъема отдельного объема горячего газа /“аэростата”/ в холодном газе под действием архимедовых сил в отсутствии тяги,
- свободная конвекция в смысле самопроизвольного подъема газа, нагревающегося от горячей поверхности без участия внешних механических сил /с тягой и без тяги/,
- свободная конвекция в смысле отсутствия движения газов вдали от нагревающих стенок /в том числе отсутствия транзитных потоков, вызванных тягой дымовой трубы/,
- свободное перетекание горячего газа через барьер на потолке /по аналогии с незатопленным переливом жидкости через плотину или свободным истечением из-под щита/,
- свободное /“водоводное”/ течение в трубе при незаполненном сечении трубы,
- свободный конвективный теплообмен в смысле передачи тепла при нулевой скорости движения газов вдали от поверхности,
- свободная струя в смысле отсутствия пространственных ограничений /стеснений/ распространения

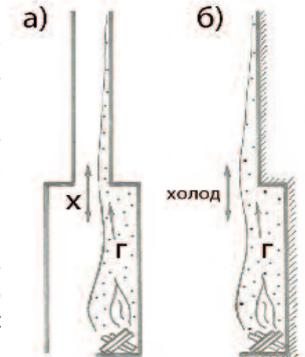


Рис.170. Если горячий поток не заполняет трубу полностью, то конвекция не стеснена, и тяги нет (а). Это доказывается мысленным удалением одной из стенок трубы (б).

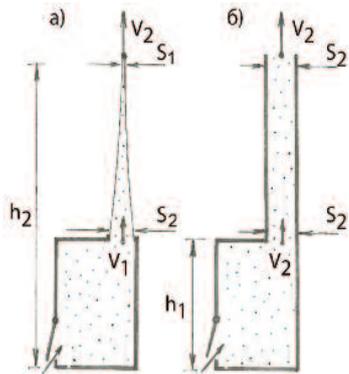


Рис.171. По гидравлической модели невязких течений не стесненно всплывающая ламинарная струя горячего газа (а) имеет меньший объемный расход $G = VS$, чем стесненно всплывающий поток горячего газа в трубе (б), из-за меньшего поперечного сечения S_1 нестесненной струи на высоте h_2 .

струи одного газа в другом газе, в том числе горячего газа в холодном,

- свободная турбулентность в смысле самопроизвольного возникновения вихрей при отсутствии механических мешалок-взвихривателей,

- свободное движение газов СДГ /Free Gas

Movement FGM/ в трактовке И.В.Кузнецова [103] - модель применения закона Архимеда /и статистического понятия температуры/ не только к объемам и микрообъемам газа, но и к отдельным "частицам" /молекулам/ газа, "предсказывающая" разделение потока дымовых газов в колпаке по химическому составу из-за свободного всплытия "горячих частиц" продуктов сгорания /"совершенно самостоятельных" молекул CO_2 и H_2O / сквозь среду /сито, матрицу/ "холодных частиц" балластных газов /молекул химически не прореагировавшего азота, паров влаги из дров, избыточного воздуха/, что противоречит классической молекулярно-кинетической теории газов.

3.6. Конвекция в частично ограниченном пространстве

Характер гравитационной конвекции существенно зависит от степени пространственного стеснения области конвекции.

Течения газов могут сильно отличаться в случаях неограниченного, полуограниченного, частично ограниченного и полностью ограниченного /замкнутого/ пространств. Действительно, наличие газонепроницаемых стенок может разделять между собой горячие и холодные газы, создавать значительные перепады давления и формировать специфические течения.

В то же время, никакие ограничения или разграничения газового пространства стенками не могут предотвратить гравитационную конвекцию. Пространственные разграничения могут лишь ослаблять конвекцию /например, в волокнистых и вспененных утеплителях в строительстве/ или, наоборот, усиливать конвекцию за счет тяги /самонапора/.

В неограниченном пространстве /костер на бесконечной горизонтальной плоскости/ и в полуограниченном пространстве /костер у стены/ могут реализовываться только самопроизвольные всплытия горячего

газа, когда вышерасположенные зоны конвективного потока не влияют на нижерасположенные. Струю от костра можно перегородить "рукой", и нижележащие части конвективного потока не почувствуют этого. То есть это аналог свободно падающей струи воды или незатопленного течения реки /в том числе с переливом через незатопленную плотину/.

В замкнутом /полностью ограниченном/ пространстве реализуются только замкнутые сами на себя циркуляционные течения /рис.165/.

В печах же характерны частично ограниченные /стесненные/ конвективные потоки, создающие вентиляционные контуры конвекции.

3.6.1. Конвекция в вертикальных трубах.

Если восходящий поток горячего газа /рис.169-а/ заключить в вертикальную трубу, то разрежение, возникающее за разгоняющейся вверх "пробкой" горячего газа, не может быть устранено радиальным потоком газа, поскольку последний возникнуть не может из-за газонепроницаемости стенок. Указанное разрежение будет невольно устраняться "подтягиванием"-ускорением газов /и горячих, и холодных/ именно снизу. Именно это разрежение, "тянущее" вверх нижние слои газа, физически обуславливает возникновение явления тяги трубы /chimney effect, stack effect/, в том числе и "виртуальной трубы" /коробки здания/ при пожаре.

Тягу иногда называют самотягой /по аналогии с самонапором/, чтобы подчеркнуть, что движение газов /в том числе и подсасываемых холодных/ обусловлено природными причинами /гравитационной конвекцией/, а не механической газодувкой. Иногда самотягой называют тягу отдельного участка газового тракта, например, топливника. В таком случае величина общей тяги газового тракта будет складываться из величин самотяг отдельных участков газового тракта, но только при отсутствии "разрывов струи", то есть при отсутствии участков с нулевой самотягой

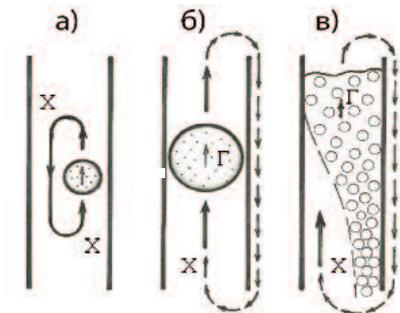


Рис.172. При всплытии небольшого /мало-го по размерам/ объема горячего газа циркуляция холодного газа X происходит внутри трубы (а), а при всплытии большого по размерам объема горячего газа Γ - вне трубы (б), что и обуславливает тягу трубы /возможность засасывания холодного газа в трубу "как пылесосом"/. Для возникновения тяги горячий газ /белые кружочки/ должен перекрывать все поперечное сечение трубы (в).

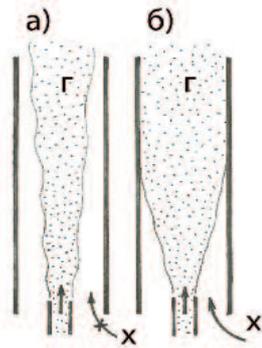


Рис. 173. Если столб горячих газов Г от газовой пламенной горелки /можно кухонной/ начинает перекрывать все поперечное сечение вертикальной трубы конечной длины, то в трубе возникает подсос холодного газа - тяга, что фиксируется по отклонению пламени спички у стрелки X.

по аналогии со случаем “разрыва напора” /раздел 2.4.7/.

Сразу оговоримся, что объяснений причин появления эффекта трубной тяги много. Все они имеют в виду одно и то же явление природы, но объясняют эффект “разным физическим языком”. Это подобно тому, как линейную скорость свободного падения тела в поле тяготения можно вычислить либо исходя из закона движения Ньютона, либо исходя из закона сохранения энергии. Результат окажется одним и тем же, но мыслительный процесс причинно-следственного осознания явления будет разным.

Подчеркнем также, что в мировых печных технических нормах и правилах под тягой стандартизованно понимается “тянущее” разрежение не где-нибудь, а именно в топливнике относительно внешней атмосферы на одном и том же высотном уровне /рис.94-а/. Именно такое разрежение образуется в топливнике в ходе устранения разрежений в дымовой трубе за счет “подтяжки” газов снизу. Это разрежение в топливнике и создает в воздухоподающей заслонке печи /или дверце поддувала/ горизонтальное движение свежего воздуха в печь /рис.162-а/.

В формулу величины тяги входит лишь высота участка тракта Н, заполненного горячим газом $\Delta p = (\rho_x - \rho_r)gH$, где ρ_r и ρ_x - плотности газа в трубе и вне трубы. Форма поперечного сечения трубы не существенна для явления возникновения тяги. Для образования эффекта тяги важно лишь, чтобы все поперечное сечение трубы было заполнено горячим всплывающим газом. Действительно, если горячим газом заполнена лишь часть трубы, то можно мысленно “безболезненно” удалить стенки в других частях трубы и получить поток газа, всплывающий в полуограниченном пространстве /рис.170/. А в нестесненных /неограниченных и полуограниченных/ потоках тяга не развивается.

Появление тяги при перекрытии горячими газами всего поперечного сечения трубы можно пояснить на примере всплывающего вверх по трубе газового “поршня” /рис.172/. Появление такого “поршня” можно наблюдать на простейшей модели газовой кухонной горелки с трубой - в момент заполнения горячим газом всего поперечного сечения трубы

появляется подсос холодного газа в трубу снизу по стрелке X, что можно установить, поднося спичку к нижнему срезу трубы /рис.173/.

Иногда, пользуясь гидравлической аналогией, печники мысленно представляют восходящую струю горячего газа в виде падающей струи воды /только “вверх ногами”/. Именно поэтому нами в разделе 2 рассматривались процессы течений жидкости в воздухе, хотя они и не отвечали исходно принятому требованию малости перепадов давления в соответствии с принципом “медленных придонных течений глубокой воды” /стр.87/.

В гидравлической модели /см. раздел 2.4.3/ повышенный расход через заполненную трубу объяснялся тем, что при одинаковых скоростях V_2 на высоте h_2 поперечное сечение свободно падающей струи S_1 меньше сечения заполненной трубы S_2 /рис.171/. Однако, в случае газов сужение восходящей струи быстро сменяется турбулентным расширением, и поэтому гидравлическая наглядность пропадает.

Вообще говоря, различий между падающей водой и всплывающими горячими газами очень много. Поэтому автор гидравлической теории печей В.Е.Грум-Гржимайло проводил модельные эксперименты все же не с жидкостью в воздухе /см.стр.89/, а с легкой жидкостью-керосином в среде тяжелой жидкости-воды [60]. И хотя такая модель более близка к ситуации горячего газа в холодном, тем не менее, и такая аналогия не является строгой, поскольку горячие газы могут смешиваться с холодными газами, а керосин с водой не смешивается [49]. А смешение - один из важнейших факторов внутривидных процессов.

Таким образом, явление тяги X_T /рис.168/ в корне отличается от явления нестесненного самопроизвольного /бестягового/ архимедова всплытия нагреваемых объемов горячего газа X_H у горячей стены и от явления эжекции X_3 /вязко-турбулентного увлечения холодного газа скоростной горячей струей/. Самопроизвольное архимедово всплытие горячего газа имеет место всегда, но только в стесненных условиях горячий газ способен дополнительно создать и тягу, то есть осуществить подсос и подъем в трубе также и



Рис.174. Поток горячего газа на потолке: а - математическая гидравлическая модель Есьмана [60] течения горячего невязкого газа, б - уозрительная гидравлическая модель течения горячего вязкого газа, ламинарно набегающего на потолок. $V(h)$ - изменение линейной скорости по толщине слоя, $h(y)$ - изменение толщины слоя по тракту.

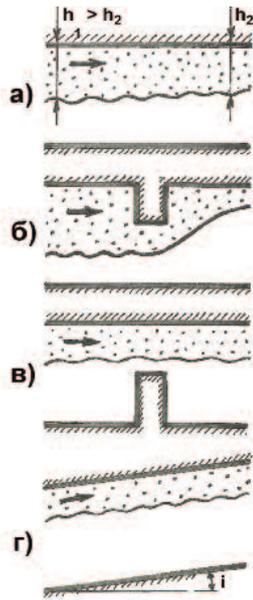


Рис.175. Течение горячего газа по горизонтальному потолку (а), течение с перетеканием через плотину (б), течение над препятствием (в), течение по наклонному потолку (г).

холодных газов. Если нестесненные всплытия горячего газа обычно создают в пространстве перепады статических давлений величиной не более 0,01-1 Па, то эффект тяги создает перепады давления на стенке трубы 1-100 Па.

Наличие тяги позволяет существенно /порой в несколько раз/ увеличить расход газа через трубу /или через конвективный зазор у стенки печи на рис.168/ по сравнению со случаем не стесненно-го архимедова всплытия горячего газа в неограниченном пространстве.

3.6.2. Конвекция в горизонтальных трубах

Легкий горячий газ стремится вверх и заполняет верхнюю часть горизонтальной трубы.

Поэтому анализ конвекции в горизонтальных трубах следует начать с особенностей движения горячих газов на потолках.

Как уже отмечалось в разделе 3.5, конвективный поток у нагретой вертикальной стены, не имеющий начальной скорости, накапливает свое количество движения постепенно по мере нагрева от поверхностей и по мере архимедова всплытия /за счет перехода потенциальной энергии в кинетическую/. Но если над нагретой стеной имеется горизонтальный потолок /"козырек"/, то горячий поток утыкается в него, тормозится, останавливается, накапливается "горкой" /рис.174/ и может даже полностью заполнить колпак /при его наличии/, как вода заполняет водохранилище /рис.175-б и рис. 176-а/.

Предположим, что горячий поток от нагретого участка стены образует на потолке "горку" горячего газа высотой H . Избыточное давление /самонапор/ в "горке" горячего газа достигнет величины $(\rho_x - \rho_f)gH$ у потолка. За счет этого избыточного давления /самонапора/ нагретый газ потечет вдоль потолка по горизонтали с неким постоянным массовым /объемным/ расходом G /рис.174/. Расстекаясь по потолку, движущийся нагретый газ приобретет форму слоя с некими толщинами h /глубинами/ по тракту движения, которые рассчитываются по гидравлической формуле Есьмана $G = Ah[2g(H - h)(\rho_x - \rho_f)/\rho_f]^{0,5}$ /см. раздел 2.4.6/.

При условии сохранения массового потока толщина слоя $h(y)$ нагретого газа по направлению движения "у" окажется постоянной $h(y) = \text{const}$, поскольку переменного решения $h(y)$ уравнение не имеет /рис.174-а/. Этот неожиданный результат в виде "плато" справедлив только для невязкого газа и свидетельствует о том, что перепады давления в невязком газе бывают только локальными в местах нагрева, а также при изменениях направлений движения /поворотах, разворотах/.

При наличии же вязкости толщина слоя нагретого газа на потолке должна уменьшаться по тракту течения для появления самонапора для компенсации потерь давления на трение /рис. 174-б и рис. 175-а/. При этом из-за вязкости профиль скорости течения нагретого газа $V(h)$ в пределах толщины слоя станет неоднородным - "параболическим" /в отличие от однородного по толщине для невязкого газа на рис. 174-а/ - скорость будет стремиться к нулю на границах потока сверху /на неподвижной стенке/ и снизу /на неподвижном окружающем газе/. Из условия постоянства объемного /массового/ расхода горячий газ должен непрерывно ускоряться вдоль по тракту движения.

Таким образом, стоит появиться вязкости, так сразу неминуемо появляется ускоряющийся утончающийся поток, а это неминуемо приводит рано или поздно к появлению турбулентно "бурлящего" режима течения. Это представляется неожиданным, поскольку при "обычном водопроводном" течении жидкости в горизонтальных трубах перепад давления из-за трения не вызывает ускорения потока. Но дело в том, что в заполненных горизонтальных трубах из-за бокового стеснения "высота" слоя не может изменяться, и перепады давления возникают из-за сжатия жидкости /а это

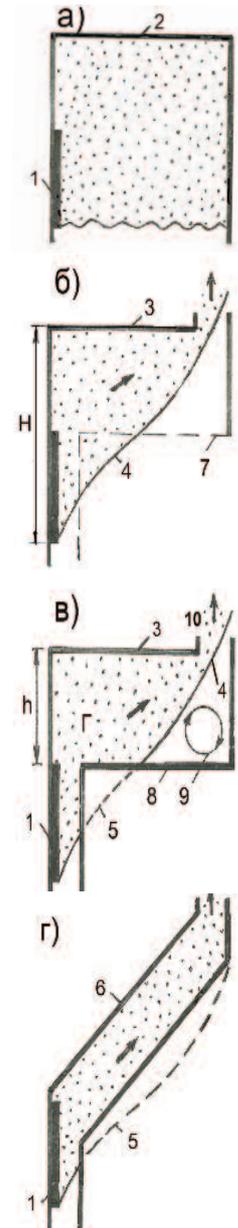


Рис.176. Пояснения к переходу от потолочного течения без тяги к трубному течению с тягой /см. текст/.

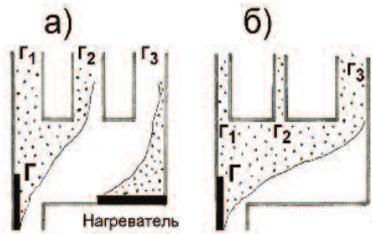


Рис.177. При малом расходе горячего газа Γ и больших поперечных сечениях труб Γ_1 - Γ_3 восходящий конвективный не способен заполнить все трубы (а). При большом расходе горячего газа или при узких трубах заполняются все трубы (б).

уже характерно для принудительных течений/. А в открытом русле /в незаполненной трубе/ перепады давления могут создаваться только самонапором - наклоном верхней /свободной/ поверхности жидкости.

Постоянная толщина слоя горячего газа на потолке будет обеспечена лишь при наличии наклонности потолка i /рис. 175-г/. Так, для вязкой воды справедлив закон Шези - гидравлический уклон установившейся открытой /свободной/ поверхности воды в открытых руслах рек-каналов равен уклону i дна русла /см.рис.105-в/, а расход воды пропорционален корню квадратному из величины уклона русла $G = Ai^{0.5}S$, где S - площадь поперечного /"живого"/ сечения потока [68].

Поскольку горячий газ располагается на потолке, то наличие нижних донных стенок борозов при малых расходах горячего газа порой бывает излишним /рис.174-б/. Газ течет по потолку горизонтального канала, не касаясь дна канала и имеющих на дне препятствий /рис.175-в/. Однако, по мере увеличения расхода горячего газа поперечное сечение канала все больше будет заполняться горячим газом и, наконец, переполнится - при отсутствии дна каналов горячий газ будет истекать в атмосферу, а при наличии дна - поднимать давление в канале /и переводить систему в "водопроводный" режим/.

3.6.3. Конвекция в проточных полостях и в наклонных трубах

Полости в вертикальных трубных системах могут смещать вертикальное восхождение горячих газов. Проанализируем переход от наклонного движения в полости к течению в наклонной трубе

При отсутствии протока газ, постепенно нагревшийся от стенового нагревателя 1 /вплоть до температуры поверхности нагревателя/, займет все

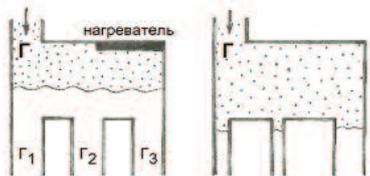
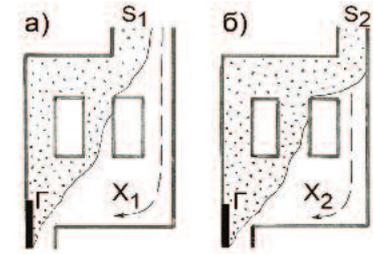


Рис.178. При любом расходе нисходящий поток горячего газа заполняет все нисходящие трубы равномерно.

Рис.179. При большом поперечном сечении выходного отверстия S_1 восходящий горячий газ Γ не может заполнить все параллельные восходящие трубы. При малом же поперечном сечении выходного отверстия S_2 /переполненного, захлебнувшегося/ восходящий горячий газ Γ заполняет все параллельные восходящие трубы за счет того, что нисходящий поток X_2 в сообщающихся сосудах увлекает за собой горячий газ сверху.



пространство полости колпака 2 и из колпака истекать не будет /рис.176-а/. Если же сделать отверстие в потолке колпака 3, то возникнет сквозной /транзитный/ проток горячего газа в виде потолочного течения с наклонной нижней свободной поверхностью 4. Отметим, что в реальности уклон поверхности 4 может быть значительно меньшим, чем это графически изображено на рис.176-б, уклон будет определяться расходом нагретого газа /рис.176-б/.

Если сквозное течение 4 ограничить дном 8 /рис.176-в/, обозначенном на рис.176-б пунктиром 7, то полуограниченное пространство течения станет ограниченным, стесненным стенками канала 8. Однако, сохранится не заполненной нагретым газом некая угловая зона 9, в которой может возникнуть вихрь. Наличие зоны ненагретого /холодного/ газа 9 в канале 8 приводит к отсутствию тяги /самотяги/ на высотном интервале h , поскольку в этой зоне можно будет удалить стенки, и ничего не изменится /точно так же, как на рис.170/. Чтобы устранить холодную зону 9, надо сделать наклонный потолок канала 6 более крутым так, чтобы нижняя поверхность потока нагретого газа 4 /обозначенная на рис.176-г пунктиром 5/ стала ниже дна канала 6. В таком случае будет обеспечено полное заполнение канала горячими газами, что и обусловит появление самотяги наклонного канала 6. Чем круче /вертикальней/ будет канал 6, тем лучше будут условия для образования тяги в канале 6.

Ясно, что размер холодной зоны 9 /не затопленной горячим газом/ является определяющим параметром течения в полости. Размер зоны 9 в горизонтальном канале 8 уменьшается с увеличением расхода горячего газа и с увеличени-

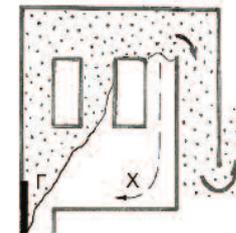


Рис.180. Если за параллельными восходящими трубами следует нисходящий канал, то все восходящие трубы заполняются горячим газом.

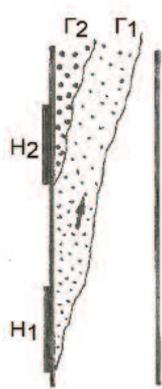


Рис.181. Гравитационный конвективный поток G_2 от настенного нагревателя N_2 развивается в гравитационном потоке G_1 от настенного нагревателя N_1 .

ем степени его турбулизации. При этом не важно, где и как создается горячий газ - нагревом ли в пределах горизонтального канала 8 /рис.176-в/ или свободно-конвективным нагревом от стенки где-нибудь ниже в вертикальной трубе 1 или принудительным нагревом в механической электронагревательной газодувке. Важно лишь, чтобы создавался бы такой расход горячего газа, при котором "захлебнется" выпускное /вытяжное/ отверстие в потолке 10 /рис.176-в/, то есть когда все поперечное сечение отверстия 10 заполнится горячим газом 4.

Тогда вся картина резко изменится - циркуляционные движения в зоне 9 /как течения в сообщающихся сосудах/ затянут горячие газы сверху вниз. Холодная зона 9 исчезнет. При этом высота потолка 3 может влиять на вероятность "захлебывания" отверстия 10 за счет турбулентности и неизотермичности потока /см.раздел 3.6.6/.

3.6.4. Конвекция в системах параллельных вертикальных труб

Рассмотрим случай когда всплывающий горячий газ /например, в виде умозрительного множества воздушных шариков на рис.169/ поднимается не в одну восходящую трубу, как, например, на рис. 176-г, а в некую систему из параллельных восходящих труб /рис.177/. При этом может случиться, что весь горячий газ G сможет беспрепятственно пройти через ближайшую восходящую трубу G_1 , а в остальные восходящие трубы G_2 и G_3 горячий газ не попадет.

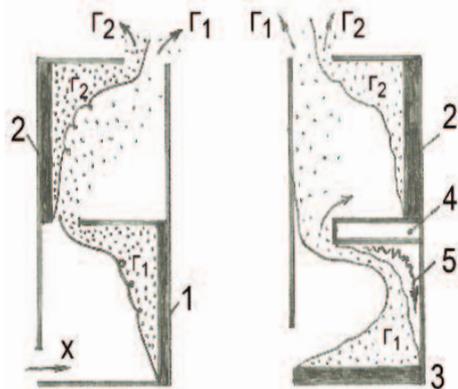
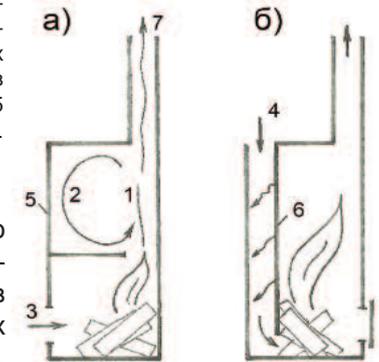


Рис.182. Пояснения к термину транзитной конвекции: конвективный поток G_2 развивается в транзитном конвективном потоке G_1 , вследствие чего транзитный конвективный поток G_1 воспринимается как "принудительный" /не зависящий от G_2 / поток от некоего гипотетического внешнего механического движителя воздуха. 1 - нижняя горячая вертикальная поверхность, 2 - верхняя горячая вертикальная поверхность, 3 - горячая горизонтальная поверхность, 4 - холодная /охлаждающая/ горизонтальная поверхность, 5 - нисходящие потоки охлажденного воздуха.

Рис.183. Транзитные потоки через печь, воспринимаемые как "принудительные": 1 - гравитационный конвективный поток горячих дымовых газов от пламени, 2 - циркуляционные течения в верхней зоне, 3 и 4 - начало транзитного потока, 5 - холодная стенка, 6 - горячая стенка топливника.



Такое поведение горячих газов легко поясняется гидравлической моделью - если падающий поток воды пустить в одну из параллельных нисходящих труб, и если эта труба "не захлебнется", то в другие трубы вода не попадет /то есть другим трубам воды "не достанется"/. Собственно, это явление свойственно даже не параллельным трубам-каналам, а самому пространству полости, поскольку и без разделительных стенок картина будет в точности такой же /рис.177/.

Если же горячий газ подается сверху вниз /за счет вентиляции или транзитной конвекции, см. раздел 3.6.5/ в систему нисходящих труб, то в этом случае все нисходящие трубы заполняются горячим газом равномерно вне зависимости от поперечных сечений труб /рис.178/.

Такое поведение горячего газа тоже легко поясняется гидравлической моделью - если вода принудительно подается в резервуар, верхняя часть которого выполнена в виде восходящих параллельных труб, то по мере заполнения резервуара все параллельные трубы будут заполняться равномерно. То есть, верхние свободные поверхности воды в трубах будут располагаться на одном высотном уровне. Собственно, это обычный закон гидростатики /см. раздел 2.3/.

Указанные обстоятельства издавна запрещали использование в печах параллельных восходящих дымоходов во избежание образования не прогреваемых зон печей. Так, идея Свизева состояла в том, что дым от отопительных печей необходимо пускать вверх обязательно по одному каналу, а опускать дым можно по нескольким каналам одновременно. Это обосновало правомочность ныне широко известных конструкций печей с параллельными опускными каналами [104].

Позднее, Грум-Гржимайло развил идею Свизева в рамках гидравлической модели применительно к металлургическим печам [60]. Было уточнено, что речь идет не просто о горячих всплывающих газах, а именно о горячих остывающих газах. Толкования исходили не из анализа возможности заполнения или не заполнения всех параллельных труб, а

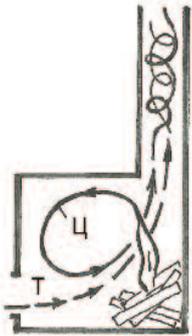


Рис.184. Гравитационные конвективные движения газов в топливнике печи: Ц - циркуляционная траектория, Т - вентиляционная транзитная траектория.

от обратного - из предположения, что все восходящие трубы полностью заполнены всплывающим горячим газом. То есть, рассмотрим случай, когда трубы Γ_1 и Γ_2 изначально полностью заполнены одним и тем же движущимся вверх /но остывающим от холодных стенок канала/ горячим газом с одной и той же температурой /рис.177-а/.

Теперь дополнительно представим себе, что температура потока Γ_1 случайно понизилась “на самую малую величину” [60]. Тогда вес столба Γ_1 станет больше, чем вес столба Γ_2 , и поэтому скорость подъема Γ_1 окажется меньше, чем скорость подъема Γ_2 . Уменьшение скорости подъема еще более понизит температуру остывающего горячего газа Γ_1 . В конце концов, случится так, что поток газа Γ_1 исчезнет совсем, и все горячие газы пойдут по каналу Γ_2 . То есть, остывающие горячие газы в силу неустойчивости течения будут стремиться пройти только по одному из восходящих каналов, а остальные окажутся не заполненными. /Правда, трудно поверить в то, что горячий газ пойдет по удаленной трубе Γ_2 , а не по ближайшей трубе Γ_1 /.

Аналогичный анализ покажет, что холодные /но нагревающиеся от горячих стенок/ газы стремятся пройти только по одному из нисходящих каналов. Так что “холодный нагревающийся поток нельзя делить на нисходящие струи”, а надо делить на восходящие [60].

На самом же деле, вышерассмотренное правило Связева имеет ограниченную область действия [49]. Во-первых, правило Связева распространяется только на прямоточные потоки горячего газа с малым объемным расходом, когда трубы не переполняются /рис.177-б/.

Во-вторых, если система вертикальных труб соединяется сверху в единый восходящий канал, и если этот верхний канал переполняется /затапливается, “захлебывается” при заданном расходе горячего газа/, то правило Связева также не работает /рис.179/. Действительно, при переполнении сечения S_2 циркуляционный поток X /как в сообщающихся сосудах/ увлекает вниз горячие газы, которые и заполняют всю систему параллельных каналов. Собственно, речь идет о заполнении всей полости горячим газом /как на рис.176-в/.

В-третьих, при наличии за параллельными восходящими трубами нисходящего канала, все восходящие трубы заполняются полностью

даже при малом расходе горячего газа, поскольку холодный газ в этом случае выдавливается /стекает/ куда-нибудь вниз /рис.180/, точно так же, как всплывают вверх в расширительный бачок воздушные пробки в системах водопровода.

В-четвертых, скорость движения в канале определяется не только температурой газа /не только скоростью архимедова всплытия/, но и газодинамическим сопротивлением канала /вязкостью и турбулентностью/. Поэтому, если газодинамическое сопротивление будет большим, то распределение расходов горячих газов по заполненным параллельным восходящим трубам будет определяться не температурами в каналах, а соотношениями величин гидродинамических сопротивлений отдельных труб /см. раздел 2.5.4/, то есть, как и в случае обычных водопроводных систем [49]. Ясно, например, что при малых проходных сечениях труб они могут легче переполниться, чем широкие /рис.177-б/.

3.6.5. Транзитная конвекция в полостях

Гравитационный конвективный поток Γ_1 от горячей поверхности H_1 , возникающий в одном узле печи, затем может проникать в другой узел /рис.181/. И там этот первичный гравитационный поток Γ_1 будет восприниматься не как собственный, а скорее как посторонний и даже как далеко не естественный, а именно “принудительный”, том в смысле, что он “приходит извне” и не определяется обстановкой во втором узле.

Такие “посторонние” /сквозные, чаще всего вентиляционные/ конвективные потоки будем называть транзитными /в отличие от “собственных”/. Понятие транзитной конвекции важно для анализа теплообмена в полостях /см. раздел 4/, поскольку отдача тепла стенкой /или поглощение тепла стенкой/ сильно зависит от скорости и температуры потока газа, обтекающего /обдувающего/ поверхность теплообмена.

Сразу отметим, что в теплотехнической литературе транзитные потоки часто называются принудительными, что оправдывают тем, что для теплообмена якобы не важно, создаются ли скорости течения /обдува/ естественными причинами или насосными. Но в печах, как мы уже подчеркивали, имеются

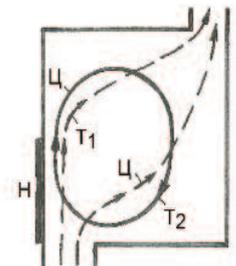


Рис.185. Одна часть транзитного потока T_1 усиливает циркуляционный поток Ц от нагревателя Н. Другая часть транзитного потока T_2 ослабляет циркуляционный поток Ц.

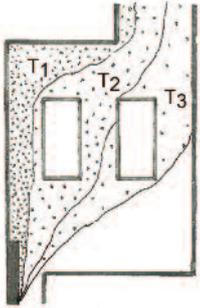


Рис.186. Пространственное распределение горячих конвективных потоков с разной температурой $T_1 > T_2 > T_3$ в многоканальной полости.

только естественные гравитационные причины появления конвекции. И во избежание недоразумений термины типа “принудительная конвекция” не желательно использовать в печах даже условно. Если гравитационная конвекция возникает только в каком-нибудь одном узле печи, то можно не вводить понятие транзитного потока, а обойтись понятиями вентиляционных и циркуляционных потоков.

Рассмотрим, например, простейший случай, когда в полости на нижнем ярусе конвективной системы возникает поток горячего газа Γ_1 , а в полости на верхнем ярусе - поток горячего газа Γ_2 /рис.182/. Ясно, что поток Γ_2 развивается в потоке Γ_1 , и поток Γ_1 воспринимается в верхнем ярусе как поток от внешнего постороннего источника. Поэтому поток Γ_1 можно назвать “транзитным”, поскольку этот поток Γ_1 выходит в атмосферу транзитом через верхний ярус.

Особый интерес представляет другой случай, когда поток горячего газа Γ_2 не просто всплывает, но и вызывает тягу в верхнем ярусе /рис.182/. Тогда возникает сквозной поток газа и через нижний ярус, и этот поток будет восприниматься там как посторонний, то есть транзитный. Так, в частности, транзитной конвекцией является сквозной вентиляционный поток газов в печи, обусловленный тягой дымовой печи. Например, нисходящий поток холодного воздуха 4, обусловленный тягой трубы 7 и нагреваемый от стенки печи 6, не выглядит с первого взгляда гравитационным /“вольным”/, но тем не менее является вполне естественным транзитным гравитационным потоком /рис.183/.

Поток свежего воздуха, с напором втекающий в топливник через воздухозаборные заслонки, также является транзитным для топливника /рис.184/. Этот транзитный поток T смешивается с циркуляционными потоками ζ дымовых газов в топливнике. При сильно разгоревшемся пламени циркуляционная траектория ζ может разорваться с образованием только прямооточной вентиляционной траектории T , как это наблюдалось на примере черной бани /рис.163/. При этом транзитный поток T усиливает /частью T_1 / циркуляцию ζ именно в области нагревателя и ослабляет /частью T_2 / циркуляцию ζ вдали от нагревателя /рис.185/.

Транзитный поток может полностью изменить картину конвективных течений. Так, появление продува холодного газа снизу способно устра-

нить переполнение горячими газами поперечного сечения патрубка S_2 на рис 179-б и препятствовать появлению самотяги в объеме полости.

3.7. Неизотермичность горячих газов

Ранее, мы рассматривали горячие газы, нагретые условно до некой единой температуры T_r , превышающей температуру окружающих холодных газов T_x /рис.176-180/.

Но в реальности изотермических горячих газов не существует. Горячие дымовые газы в печах могут иметь разную температуру, а поэтому и разную плотность. Горячие газы могут охлаждаться около холодных стенок и становиться более тяжелыми. Горячие газы могут также продолжать нагреваться и становиться еще более легкими.

В результате получаются горячие газы с самой разной температурой. И чуть более горячие газы начинают всплывать в чуть менее горячих газах. И в сообщающихся сосудах колено с чуть более горячими газами становится чуть легче колена с чуть менее горячими газами, и возникает конвективное течение газов.

Сразу подчеркнем, что для подобных явлений простейшая гидравлическая модель, строго говоря, не справедлива. Гидравлическая модель оперирует только с двумя участниками движения - с тяжелой водой и с легким воздухом. Но вода не может превращаться в легкий воздух, а воздух не может превращаться в тяжелую воду.

3.7.1. Продольная и поперечная неизотермичность

Рассмотрим два случая неизотермичности. В первом случае температура горячих газов неизменна по всему поперечному сечению канала или полости, но изменяется /увеличивается или уменьшается/ вдоль тракта. Такая ситуация наиболее распространена в печах с турбулентными течениями в каналах /в “дымопроводах”/ и будет обсуждена в разделе 4 в части динамики газа и в разделе 7 в части теплообмена. Во втором случае температура горячих газов изменяется по поперечному сече-

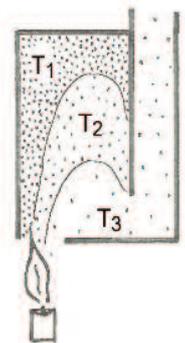


Рис.187. Пространственное распределение горячих конвективных потоков с разной температурой $T_1 > T_2 > T_3$ в тупиковой полости.

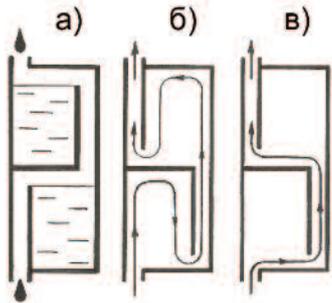


Рис.188. Моделирование двухколпаковой печи И.С.Подгородникова [96]: а - гидравлический аналог [6], б - ход горячих газов в холодных колпаках, в - ход холодных газов в горячих колпаках [98].

нию проточной полости или канала, вследствие чего возникают циркуляционные потоки и даже встречные движения горячих газов, особенно в колпаках.

Так, например, при конвективном нагреве у горячей стенки самую высокую температуру приобретают глубинные слои потока T_1 /рис.186/. Они наиболее энергично всплывают вверх и проходят через ближайший восходящий канал. Потоки же с более низкой температурой T_3 распределяются по восходящим каналам более равномерно и с большей вероятностью переполняют /затапливают/ каналы хотя бы потому, что их объемный расход обычно велик. При этом вся полость заполняется преимущественно менее горячими газами T_3 , и именно они создают самотягу полости /как элемента сети/. А наиболее горячие газы T_1 тяги не создают, а лишь самопроизвольно всплывают в потоке медленно всплывающих менее горячих газов T_3 .

Именно для этих самых горячих газов T_1 лучше всего работает правило Свиязева, например, в топливниках печей для высокотемпературных пламен над горящими дровами. Именно эти раскаленные огненные факелы, имеющие малый расход горящих горючих газов, устремляются в то или иное хайло многохайлового топливника. А большие количества менее нагретых газов T_3 - продуктов горения, окружающих факел, переполняют, как правило, все вертикально восходящие каналы /"захлебывают сливные отверстия"/ и создают самотягу топливника и восходящих каналов /см. далее в разделе 5/.

Для оценки значимости уровня собственной конвекции в проточной полости высотой H , имеющей перепады абсолютной температуры воздуха ΔT , в теории вентиляции вводится понятие безразмерного числа Архимеда $Ag = (\rho_x - \rho_T)gH/\rho V_T^2 = gH\Delta T/TV_T^2$ как соотношения кинетических энергий собственного /в том числе циркуляционного/ конвективного потока горячего воздуха $\rho V_C^2/2 = (\rho_x - \rho_T)gH$ в полости и сквозного транзитного потока $\rho V_T^2/2$ с линейной поступательной скоростью V_T . Ясно, что чем выше перепады температур ΔT в полости и чем больше высота полости H , тем большую роль в траектории потоков будет играть собственная конвекция в полости. И для самых горячих газов с высокой

величиной ΔT факт наличия транзитных потоков может оказаться мало существенным. Так, например, верхняя часть пламен в топливнике все равно будет подниматься вверх даже в случае нисходящих движений холодного воздуха, входящего в топливник сверху.

Циркуляцию-круговорот в полостях /в том числе и колпаках/ в отсутствии протока вызывают в первую очередь высокотемпературные потоки. Но именно они как наиболее горячие стремятся также и "выскользнуть вверх" через отверстие в потолке и превратиться в вентиляционные потоки даже при отсутствии сквозного транзитного протока /то есть при отсутствии тяги/. При этом становятся важными величины поперечных сечений вентиляционных отверстий полости. Действительно, поднявшийся в верхнюю часть полости циркуляционный горячий газ оказывается перед дилеммой - вернуться ли вниз к нагревателю /и замкнуть тем самым циркуляционную кривую/ или всплыть в отверстие в потолке полости /и создать тем самым вентиляционный поток/. И величина вентиляционного потока будет при этом определяться не только температурой горячего газа /или самотягой полости/, но и размером отверстий полости и их геометрическим расположением.

3.7.2. Модель "вольного" движения

Поперечная неизотермичность может возникать не только при нагреве холодного газа, но и при охлаждении горячего газа. Охладившийся газ становится тяжелее. А поэтому он более склонен опуститься вниз к нагревателю и замкнуть тем самым циркуляционную кривую. Так, например, горячий газ, поступая в холодный колпак, не накапливается бесконечно в нем, а постепенно охлаждается и опускается вниз /рис.187/.

Такое явление не может быть описано простейшей гидравлической моделью. Действительно, если вода поступает в наполненный стакан, то согласно простейшей гидравлической модели она должна тотчас слиться через края стакана, в частности, в нижерасположенный стакан /рис.188-а/. Вода не может пойти сначала на дно стакана и только потом вылиться из стакана - для этого необходимы дополнительные уточнения и усложнения гидравлической модели /учет наличия более

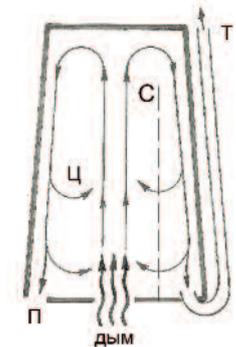


Рис.189. Движение дыма от сигареты в перевернутом стакане. Ц - циркуляционные потоки, П - выход дыма с "пода" стакана, Т - выход дыма с тягой трубки, С - стенка-перегородка.

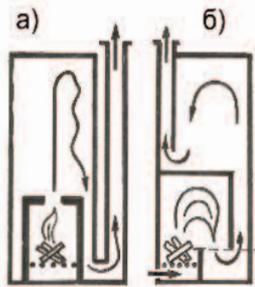


Рис.190.Схемы печей с "вольным" движением дыма: а - колпаковая /струйная/ печь В.Е.Грум-Гржимайло, патент России №1219 от 14.03.1917, б - отопительная печь И.С.Подгородникова "двойной колпак" [96].

тяжелой холодной воды и более легкой горячей воды, а также учет наличия у воды поступательной скорости, то есть запаса кинетической энергии, достаточного, чтобы пробить неподвижную воду на некоторую глубину/.

Точно так же, в рамках простейшей гидравлической модели, горячий газ не может войти в колпак, имеющий ту же температуру /или более высокую/, поскольку горячий газ не может самопроизвольно всплывать в горячем газе той же температуры /или в более горячем газе/. В рамках простейшей гидравлической модели горячий газ может войти только в холодный колпак /точнее в "пустой" от горячего газа колпак с холодным газом/ и заполнить этот колпак, выдавив оттуда весь холодный газ, после чего последующие порции горячего газа будут переливаться через края колпака вверх.

Теперь же попытаемся усложнить такую простейшую гидравлическую модель, предполагая, что горячий газ в колпаке постоянно охлаждается и, утяжелившись, самопроизвольно опускается и покидает колпак, выдавливаясь под напором непрерывно поступающих в колпак "свежих" легких горячих газов /рис.188-б/.

Такую ситуацию рассмотрел И.С.Подгородников на своем известном примере поведения "дыма в опрокинутом стакане" [96]. К краям стакана приклеивается кружок бумаги с отверстием по центру для входа дыма и с отверстиями П сбоку для выхода дыма /рис.189/. Одно из выходных отверстий П можно оснастить трубочкой Т для имитации дымовой трубы. Стакан опрокидывается, и к центральному отверстию бумажного кружка подносится горящая папироса. Можно видеть, что струйка

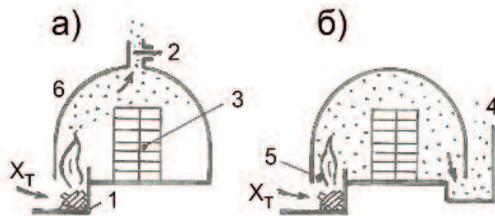


Рис.191. Печи обжига кирпича с "прямой" (а) и "обращенной" (б) тягой [60]. 1 - топка, 2 - труба дымовая с задвижкой, 3 - штабель сырого кирпича, 4 - труба дымовая для удаления дыма с уровня пода, 5 - напорный канал, 6 - камера обжига

табачного дыма не идет сразу в боковые отверстия П, а направляется сначала вверх, охлаждается у доньшка стакана, поворачивает вниз и вдоль стенок стакана стекает к нижним боковым отверстиям П, в частности, может выйти через имитатор дымовой трубы. Часть опускающегося дыма подсасывается центральной восходящей струйкой дыма и вновь увлекается вверх, образуя циркуляционный поток Ц.

Такое поведение горячего дыма И.С.Подгородников, ссылаясь на работы М.В.Ломоносова, назвал "вольным" движением газов [98]. Но М.В.Ломоносов под вольным движением называл гравитационную конвекцию вообще. А И.С.Подгородников рассматривал именно колпак с горячим газом, в котором холодный опускающийся газ может появиться лишь за счет охлаждения горячего газа. Причем такое "вольное" движение газов И.С.Подгородников приписывал как достоинство именно печных колпаков. Хотя ясно, что точно такое же "вольное" движение возникает и в обратных каналах как сообщающихся сосудах при разных весах колен, например, при разделении опрокинутого стакана на каналы коаксиальной трубчатой стенкой-перегородкой С /рис.189/.

Так или иначе, колпаковым схемам уделяют в печном деле особое место /рис.190/. Так, в частности, в ГОСТ 2127-47 отмечалось, что в колпаковых печах газы движутся "свободно внутри полостей" /см.раздел 4.3/. То есть считается условно, что в каналах печи дым движется якобы "принудительно" /а фактически транзитно/ под тягой трубы, а вот в колпаках печи дым движется "вольно" /"свободно"/ без участия тяги трубы.

3.7.3. Модель обращенной тяги

В.Е.Грум-Гржимайло при объяснении характера движения пламени /как движения легкой жидкости в тяжелой/ использовал опыты с "обращенной" тягой на примере кирпичеобжигательных печей [60].

Печи для обжига кирпича ранее представляли собой огнеупорную камеру обжига б, в которую подавались горячие дымовые газы из топки 1 /рис.191-а/. Горячий дым поднимался вверх к своду и выходил в дымовую трубу - в дымовое окно 2. Постепенно прикрывая задвижку на

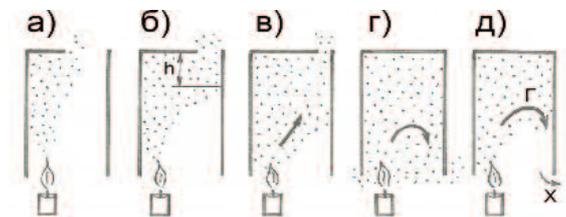


Рис.192. Пояснение физической сути "прямой" и "обращенной" тяги /см.текст/.

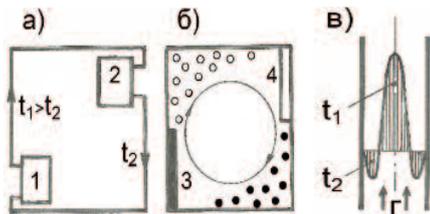


Рис.193. Схема циркуляций: а - система водяного отопления, б - система воздушно-го отопления помещения, в - восходящий горячий газ в холодной трубе. 1 - котел для нагрева воды, 2 - прибор водяного отопления /конвектор, радиатор, регистр, "батарея"/, 3 - конвектор, 4 - холодные стены.

дымовой трубе, добивались того, что бы камера обжига все больше и

больше заполнялась бы горячим дымом сверху. Наконец, горячий дым касался пода, на котором установлен штабель обжигаемого кирпича 3. В этом режиме и обжигали кирпичи. Однако, режим обжига являлся неустойчивым - при снижениях скорости сгорания топлива уровень дыма в камере обжига поднимался вверх и уже не достигал пода, вследствие чего качество обжига кирпича снижалось. Такие печи В.Е.Грум-Гржимайло назвал печами с "прямой тягой" /"печами-уродами"/.

Впоследствии, дымовое окно в своде исключили совсем, и выпуск всего горячего дыма из печи стали делать снизу /191-б/. Такие печи В.Е.Грум-Гржимайло назвал печами с "обращенной тягой" [60]. В таких печах потоки горячего дыма /"пламя"/ всегда достигали пода, чем и обеспечивалась повышенная равномерность обжига кирпича.

Более детальный механизм движения горячих газов следующий. При большом размере отверстия в потолке колпака весь горячий газ беспрепятственно всплывает через отверстие, не вызывая появления тяги в колпаке /рис.192-а/. При уменьшении же размера отверстия /при фиксированном расходе горячего газа/ отверстие "захлебывается", становится не способным пропустить весь всплывающий горячий газ. Горячий газ начинает накапливаться в колпаке, создавая наверху слой горячего газа толщиной h /рис.192-б/. Этот слой /"мешок", "пирог"/ горячего газа создает напор горячего газа вверх, и за счет этого увеличивается расход горячего газа через отверстие, обеспечивая удаление горячего газа с прежней скоростью /рис.193-в/. Наконец, при некоем размере отверстия слой горячего газа достигает краев колпака. Уже не в состоянии пройти весь через отверстие, горячий газ начинает изливаться через края колпака /рис.192-г/. Все эти этапы наглядно описываются простейшей гидравлической моделью на примере кухонной раковины с нижним сливом.

Теперь учтем, что горячий газ может остывать у холодных стенок колпака, в предельном случае превращаясь в совсем холодный газ. В рамках простейшей гидравлической аналогии "обращенной реки" это означает, что жидкость, наполняющая стакан, исчезает /как-бы "испаряется", превращается в газ/, и стакан становится "бездонным" - сколько жидкости ни лей, заполнить его жидкостью невозможно /вливается жидкость, а выливается газ/. Так же и в случае бесконечно большого колпака - сколько ни подавай горячего газа

/дыма/, все равно газ остынет и выйдет из колпака /выдавится/ в холодном состоянии. Это и есть переход к модели "вольного" движения И.С.Подгородникова. Но в реальности, в печах столь "громоздких" /и столь сильно охлаждающих/ колпаков нет, и приходится оценивать, насколько сильно горячий газ может охладиться в каждом конкретном колпаке.

Но "громоздкие" колпаки в быту все же есть. Это, в частности, жилые помещения, в которых расположен нагреватель малой мощности /рис.193-б/. Так, приехав зимой на дачу и включив электроплитку, дачник тут же убеждается, что все тепло улетает вверх и вниз уже не возвращается. Но стоит только поставить вентилятор, обдувающий электроплитку, так тотчас тепло сверху начинает достигать пола /см. раздел 4.6/.

3.7.4. Модель сообщающихся сосудов

Принцип вольного движения воздуха по М.В.Ломоносову в корне отличается от модели "вольного" движения С.И.Подгородникова. Вольным движением М.В.Ломоносов называл любую гравитационную конвекцию, проявляющуюся не только в колпаках и полостях, но и в стволах горных шахт /рудников/, то есть в каналах /вертикальных колодцах/. Причиной движения воздуха в каналах по М.В.Ломоносову являются разные веса колен сообщающихся сосудов - ведь столб теплого воздуха легче столба холодного воздуха [99]. Для определения траекторий горячих газов достаточно лишь рисовать любые замкнутые контуры и "взвешивать" колена. При таком анализе можно исключить дополнительные поясняющие модели, поскольку сообщающиеся сосуды в жизни человека столь же обыденны, как и река.

Модель сообщающихся сосудов включает в себя и модель вентиляционно-циркуляционной конвекции /раздел 3.4/. Эта модель пригодна как для водоводных, так и для водопроводных систем. Так, модель сообщающихся сосудов часто привлекается для объяснения работы систем водяного и воздушного отопления зданий /рис.193-а и рис.193-б/.

Отметим, что самопроизвольные тонущие /нисходящие относительно внешней атмосферы/ движения остывающих дымовых газов возможны только как циркуляционные. А для открытых с торцов дымовых труб нисходящие пристеночные потоки остывающих дымовых газов не характерны /хотя именно обратное часто утверждается в литературе по каминам/. Действительно, остывающий в трубе дым всегда остается более теплым, чем воздух "на улице", и должен подниматься вверх относительно атмосферного воздуха. Если же все же охлаждающийся дым опускается, то это значит, что выше по трубе имеется сильное заужение, нарушающее связь с атмосферой /рис.193-в/.