

5. Топочные устройства печей

Под топочными устройствами печей /топливниками, топками, камерами сжигания или сгорания/ будем понимать разного рода полости, в которых горят дрова. Топочные устройства служат для преобразования потенциальной химической энергии, запасенной в дровах, в реальное тепло в виде горячего дымового газа и лучистой энергии.

Топочные устройства должны удерживать и нагревать дрова, подавать воздух для горения, обеспечивать сжигание образующихся летучих /горючих газов и туманов/ и углей, накапливать тепло в теплоемких стенках и/или передавать тепло в помещение, не допускать распространения газов и дымов в помещение, направлять газы в конвективную систему теплоотбора или непосредственно в дымовую трубу.

5.1. Конструктивные типы топливников

В отличие от конвективных систем, топочные устройства бытовых печей в государственных нормативных актах не классифицировались. Приведем для сведения сложившуюся в литературе систематизацию [44, 105, 113], не углубляясь в детали конструкторских решений [106].

Первичным фактором систематизации топливников является тип ложа для дров. Различают ложа в виде глухого воздухо непроницаемого пода и ложа в виде решетчатого воздухопроницаемого пода /рис.231/.

Глухой /сплошной, газонепропускающий/ под является наиболее простым техническим решением - он с древнейших времен использовался для костров в виде грунтовой площадки /кострища/, зачастую огороженной, например, камнями. Такая площадка в курном исполнении для отопления и приготовления пищи называлась подиной, топкой, очагом, каминусом, жаровней, горном, мангалом и т.д. Огнестойкую площадку изготавливали и из металла, в том числе, в переносном виде. Глухой под с арочным или сводовым перекрытием стали называть камерой /латин./, горнилом или печью /славян./

Глухой под широко использовался в русских духовых печах и классических каминах, но уже давно считается устаревшим решением. В современных российских отопительных печах глухой под используется

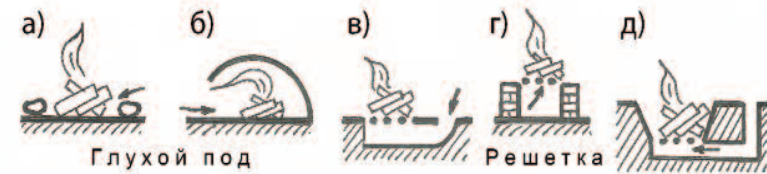


Рис.231. Ложе /под/ в костровых устройствах: а, б - глухой под, в, г, д - решетчатый под.

весьма ограниченно, поскольку не обеспечивает облегченный приток воздуха в глубину закладки дров. В то же время, в странах Западной Европы глухой под до сих пор широко используется в отопительных печах, в том числе и по причине повышенной полноты сгорания летучих.

Решетчатый под /с поддувалом/ был впервые использован для слоевого сжигания каменных углей в каминах, печах и котлах. Решетка позволяла удалять шлаки в зольник при шуровке и, кроме того, обеспечивала подвод воздуха в глубину слоя горящего угля.

Каменноугольные решетки имеют особую, удобную для чугунного литья форму прутьев - колосниковую, сужающуюся к низу для беспрепятственного просыпания шлака /окускованной подплавленной золы/. Решетки же для дров могут иметь произвольную форму прутьев, поскольку зола /пепел/ при сжигании древесины образуется в небольшом количестве - менее 1% (а у угля-антрацита 5%), не расплавляется, не окусковывается и в виде неомокующейся минеральной пыли легко просыпается через любую решетку. Тем не менее, бытовые печники зачастую условно называют "колосниковыми" любые топочные решетки, хотя прутья решеток для дров порой изготавливают из арматурной стали круглого сечения. Решетки могут занимать не всю площадь пода /вариант комбинированного пода/.

Глухой под используют при необходимости упрощения печи и/или для замедления горения дров и накопления в топливнике большого количества углей и/или для повышения полноты сгорания летучих /за счет меньшего выхода летучих и их сжигания в атмосфере, более богатой кислородом/. Решетчатый же под используют для быстрого разгорания и сгорания дров (в том числе и сырых) и остаточных углей и/или для повышения

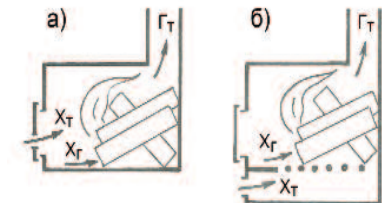


Рис.232. Глухой (а) и решетчатый (б) под в печах с тягой трубы: Г_Т - поток горячих дымовых газов, создающий тягу трубы, Х_Г - часть свежего холодного воздуха, засасываемая в закладку дров /на горение/, Х_Г - полный поток свежего холодного воздуха, засасываемый тягой трубы.

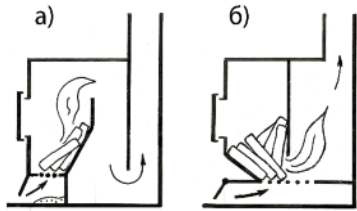


Рис.233. Шахтные топливники: а - топливник верхнего горения /в данном случае топливник Браббе с нижним дымооборотом/, б - топливник нижнего горения.

КПД печи за счет снижения количества избыточного воздуха, бесполезно уносящего тепло в атмосферу.

Отметим, что процессы горения дров на глухом и решетчатом подах сильно зависят от наличия /и от величины/ тяги печи и от особенностей подачи воздуха в топливник /раздел 5.2/. В любом случае, в закладку дров на горение поленьев всегда поступает меньше воздуха X_r , чем засасывается в печь X_T /рис.232/

Вторым фактором систематизации является схема организации горения дров в топливнике [114]. В топливнике верхнего горения пламя расположено над закладкой дров /рис.233-а/. В топливнике нижнего горения пламя расположено под закладкой дров /рис.233-б/. Имеются и другие схемы организации горения, например, “обращенного” горения, когда воздух подается не через поддувало, а в бункер для дров /рис.233-б/, а также “пиролизная” схема, когда горение летучих происходит под решеткой /рис.22/. В этой книге мы ограничимся наиболее распространенной в бытовых печах схемой верхнего горения /рис.233-а/.

Третьим фактором систематизации является наличие “шахты” - углубления для дров /рис.231-д/. Так, схемы рис.233 являются шахтными, причем стенки шахты в данных случаях являются наклонными, но могут быть и вертикальными. Шахты используются для предотвращения разваливания /и даже вываливания/ закладок горящих дров или для предотвращения раскатывания углей по поду или по решетке топливника.

Например, некогда использовавшийся топливник Свизева являлся шахтным топливником с глухим подом /рис.234-а/, обеспечивавшим скатывание углей в углубление [44]. Топливник Лукашевича имел решетку на дне шахты /причем вращающуюся вокруг горизонтальной оси для оперативной прочистки/, что обеспечивало большую скорость выгорания углей /рис.234-б/. Топливник же Степанова и

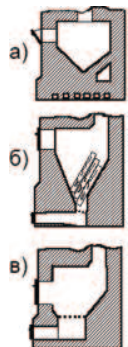
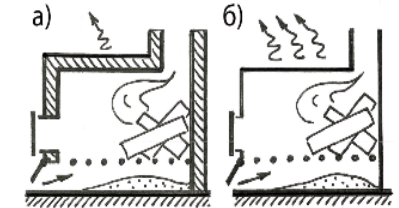


Рис.234. Топливники шахтные с наклонными стенками: а - топливник Свизева с глухим подом, б - топливник Лукашевича с решетчатым подом, в - топливник Степанова и Войницкого с решетчатым подом [106].

Рис.235. Топливник теплоемкий кирпичный (а) и нетеплоемкий металлический (б). Волнистыми стрелками показаны уровни интенсивности лучистого излучения, определяемые температурой внешних сторон стенок топливника.



Войницкого /известный также как топливник Чаплина [106]/ имел более мелкую шахту и более крутые /комбинированные наклонно-вертикальные/ стенки, что уменьшало, в частности, теплоемкость боковых стенок топки и предотвращало зависание дров при обрушениях закладок /рис.234-в/.

Четвертым фактором систематизации являются теплотехнические свойства топливника. Кирпичные /высокотеплоемкие, но низкотеплопроводные/ топливники долго прогреваются, зато накапливают много тепла, а впоследствии в раскаленном состоянии выполняют роль теплоизолятора топочного пространства /рис.235-а/. Металлические /низкотеплоемкие, но высокотеплопроводные/ топливники быстро прогреваются, не накапливают тепла, но затем в раскаленном состоянии начинают интенсивно выделять тепло наружу из топливника [115].

С поглощением тепла из топочного пространства связано расхожее понятие “холодного ядра топливника” как элемента, не нагревающего дрова. Так что теплоемкие стенки топливника являются “холодным ядром”, но лишь на начальном этапе протопки. А нетеплоемкие быстропрогревающиеся стенки, не считающиеся обычно “холодным ядром”, тем не менее постоянно и интенсивно отводят тепло из топливника.

В конструкциях топливников часто комбинируются высокотеплоемкие и низкотеплоемкие материалы в целях достижения необходимых потребительских свойств печного устройства. Так, в кирпичных отопительно-варочных печах и в кухонных плитах кирпичные стенки топливника сочетаются с чугунным настилом и чугунными дверками.

Пятым фактором систематизации является конструктивное пространственное соотношение /совмещение или разделение/ стенок топливника и стенок печи. Различают “наружные”

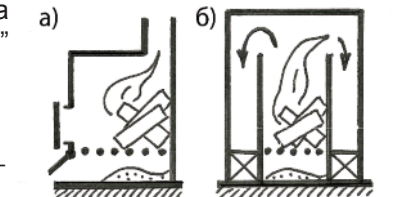


Рис.236. “Наружное” (а) и “внутреннее” (б) расположение топливников в печи.

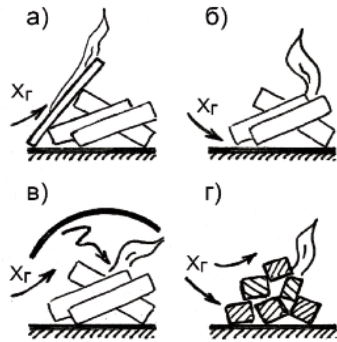


Рис.237. Режимы горения дров: а - режим лучины, б - режим костра, в - режим штабеля, г - режим углей. Здесь и далее, $X_{Г}$ - свежий воздух, входящий вглубь закладки дров в счет компенсации уходящих /поднимающихся вверх/ горячих дымовых газов, в котором собственно и горят дрова.

топливники, стенки которых являются стенками печи /рис.236-а/ и “внутренние” /встроенные/ топливники, стенки которых расположены внутри печи и не являются стенками печи /рис. 236-б/.

“Наружные” топливники участвуют в выводе тепла в помещение и поэтому имеют, как правило, меньшую температуру стенок, чем “внутренние” топливники. “Внутренние” же топливники не участвуют в выводе тепла в помещение, их задачей является максимальная степень передачи тепла от химической реакции горения дров в теплоемкую конвективную систему печи посредством потоков горячих дымовых газов.

5.2. Режимы горения дров

Прежде, чем продолжить систематизацию топливников в части способов ввода воздуха и нагрева дров, поясним особенности горения дров именно в топливнике печи. Как мы уже отмечали, по чисто энергетическим причинам крупные поленья /в отличие от мелких/ могут гореть пламенем на открытой площадке /то есть в холодном окружении/ только в форме костра - коллективным образом в виде кучи поленьев /см. разделы 1.2.4 и 1.3.7/. Там, внутри закладки /груды/ дров в промежутках между горящими поленьями образуются пламенные “микротопки” с обугленными раскаленными деревянными “стенками”, где одни горящие поленья своим пламенем и излучением греют другие поленья /соседние/. Поэтому крайне важно организовать эффективную вентиляцию внутренних полостей костра так, чтобы свежий воздух проникал именно в “реакторы процесса” - непосредственно в “микротопки”, где терморазлагается /газифицируется/ и воспламеняется древесина.

Если свежий воздух перестает проникать вглубь закладки дров, то горение углей и летучих в “микротопках” прекращается, древесинные стенки “микротопки” остывают, процессы пиролиза в “микротопках” затухают и горение дров увядает. В этом неблагоприятном случае пламен-

ное горение мыслимо только в форме пламени на внешних сторонах закладки дров. Такая ситуация реализуется, в частности, в случае пожара /неконтролируемого горения/ на складе штабелей плотно уложенных обрезных досок, когда штабели один за другим поджигаются и горят под влиянием мощного внешнего источника теплового облучения.

Такая модель горящего “штабеля” как раз и может реализовываться в топливнике печи в случае появления раскаленных стенок топливника с температурой более 500°C. При таких температурах стенок топливника мощность лучистых /инфракрасных/ потоков со стенок топливника на дрова такова, что над облучаемой древесиной /наружных сторон поленьев/ возникают концентрации летучих продуктов пиролиза, достаточные для воспламенения от постороннего источника /раздел 1.2.1/.

Легко сообразить, что пожар склада “штабелей” по-существу представляет собой костер “штабелей”. А плотно уложенный “штабель” фактически эквивалентен единому цельному полену. То есть в сильно раскаленной топке печи могут воспламеняться и сгорать даже одиночные крупные чурбаки /раздел 5.3/. Все это относится, специально подчеркнем, только для процесса пламенного горения древесины. Процессы тления древесины имеют иные особенности /раздел 1.4/.

Тезис наличия разных режимов пламенного горения дров очень важен для понимания работы топливника /рис.237/. Если при растопке дровяной печи /с помощью “спички, бумаги и щепок”/ реализуется “режим лучины” /способной гореть даже в одиночку в холодной атмосфере/, то в случае в случае разгорания крупных поленьев реализуется “режим костра”, а затем по мере разогрева стенок топливника достигается “режим штабеля”. Процесс горения дров завершается “режимом углей”, который практически не зависит от температуры стенок топливника.

В то же время ясно, что все эти режимы пламенного горения /каждый из которых помогает наглядно понять механизм горения дров/, в реальных условиях топливника происходят совместно и одновременно /рис.238/. Более того, режим “штабеля” в условиях топливника печи

Рис.238. Комбинированный режим горения дров: 1 - обугленные поленья, 2 - пламя из микротопки, 3 - белый дым с холодных зон поверхности древесины, 4 - тепловое излучение со стенок топливника, 5 - черный дым. $X_{Г}$ - свежий холодный воздух, проникающий внутрь закладки и идущий на горение дров, $X_{Э}$ - свежий холодный воздух, эжектируемый /вязко или турбулентно увлекаемый/ потоком горячих газов в пламени.



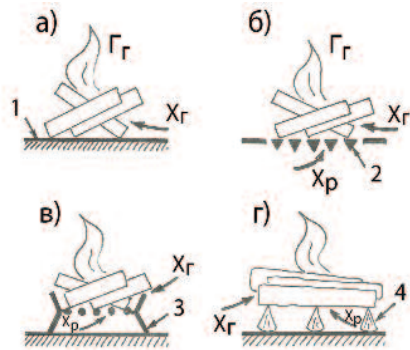


Рис.239. Закладка классического костра на глухом полу (а), на решетчатом полу (б), на глухом полу в металлической корзине (в), на глухом полу со специальной укладкой поленьев в виде "сгораемой деревянной корзины" (г).

намного более сложен, поскольку реальные дрова абсолютно плотно в топливник заложить невозможно, да никто и не ставит такой задачи. Так что дрова всегда горят в микротопках, причем горят именно обугленные

дрова /в режиме углей/ в отсутствии плотной укладки /в режиме костра/, но при наличии теплового облучения со стенок топливника /в режиме штабеля/. При этом происходят сложные перекрестные явления - свежий воздух X_T поддерживает горение обугленных стенок микротопок, что вызывает нагрев и пиролиз древесины и выход из нее летучих, которые в случае нехватки воздуха X_T догорают пламенем над дровами 1 в эжектируемом воздухе X_3 , при этом выделяющийся из холодных зон поверхности древесины "белый дым" 3 /туман летучих/ увлекается пламенем 2 /то есть воздухом X_3 / вверх и может испаряться под действием излучения со стенок 4 /а при высокой температуре стенок может и воспламеняться/, при нехватке воздуха X_3 кончики пламен 2 срываются в "черный дым" 5, который не может быть устранен даже мощным облучением 4 и должен предотвращаться подачей вторичного воздуха и т.д.

5.3. Системы подачи воздуха

Вопросы подачи воздуха, также как и вопросы подбора, укладки и розжига дров, касаются не только печников, но и истопников - пользователей печей. Дело в том, что бытовая печь - это фактически просто инструмент в руках истопника. Печь может хорошо работать, а может и плохо в зависимости от особенностей эксплуатации, точно также как кухонная кастрюля может удач-

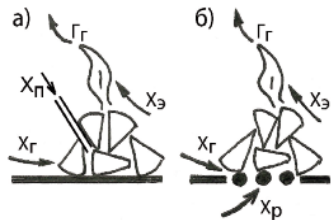


Рис.240. Поток газов в костре на глухом и решетчатом полу в отсутствие тяги.

Рис.241. Микротопки /зазоры-промежутки/ между вертикально установленными поленьями образуют дымовые каналы с появлением тяги



но приготовить пищу, а может и неудачно в зависимости от квалификации конкретного повара. Во всяком случае конструкция печи должна предусматривать возможности управления печью в части подачи воздуха так, чтобы истопник мог подобрать нужный режим эксплуатации.

5.3.1. Поступление воздуха в костер

Классические костры горят в воздушной атмосфере, пространственно не ограниченной со всех сторон стенками /раздел 3.6/. В кострах нет тяги, и горячий дымовой газ Γ_T /обедненный кислородом/ самопроизвольно всплывает вверх под действием сил Архимеда /как воздушный шар/, а на смену ему /в компенсацию/ со всех сторон подсасывается свежий холодный воздух X_T , идущий на продолжение горения поленьев в глубине закладки дров /рис.239-а/. Причем, сколько горячего дыма Γ_T из костра всплывает, ровно столько в костер и засасывается холодного свежего воздуха X_T . То есть, достигается количественная саморегулировка - чем интенсивней потребляется воздух на горение и чем быстрее /легче/ образовавшиеся при этом горячие дымовые газы выходят из закладки дров, тем больше свежего воздуха поступает в закладку на горение /при этом ведущую роль все же играет скорость сгорания/.

В прежние времена в эпоху русских подовых духовых печей и курных банных каменок умение удачно подобрать дрова и сложить их в дружно разгорающуюся закладку считалось бытовым искусством, ныне во многом забытым [116]. Необходимо было так уложить поленья на под печи, чтобы зазоры-промежутки между поленьями были минимальными /для лучшей передачи тепла от одних поленьев к другим/, но, тем не менее, достаточно большими, чтобы свежий воздух мог легко проникать между поленьями вглубь закладки, а дымовые газы могли легко покидать закладку дров.

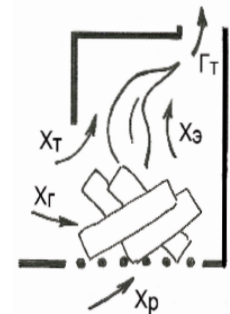


Рис. 242. Поток газов в костре на решетчатом полу при наличии тяги /в данном случае в виде вытяжки в зонте/.

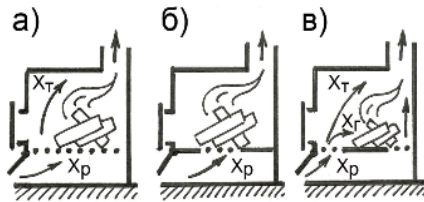


Рис.243. Топливники с решетчатым подом: а - решетка по всему дну топливника, б - центральная решетка ограниченных размеров, в - периферийная решетка ограниченных размеров.

Костер может разжигаться не только на глухом поде, но и на решетчатом поде. Так, решетка издавна широко используется в классических бытовых каминах /со времен начала топки городских каминов каменным углем в Англии/. Между крайними случаями глухого пода /рис.239-а/ и решетчатого пода /рис.239-б/ имеются многочисленные способы подачи воздуха в дрова в форме металлических корзин для дров на глухом поду /рис.239-в/ и особых способов укладки дров на глухом поду /рис.239-г/. Ясно, что особые укладки дров /например, "колодец" или "костром"/ эквивалентны сгорающим деревянным корзинам, а сами корзины в отсутствии тяги аналогичны решетчатому поду.

При появлении решетки возникает дополнительный поток свежего холодного воздуха в дрова X_p . Легко видеть, что свежий холодный воздух через решетку X_p тотчас попадает вглубь горящих дров, а на глухом поде свежий воздух X_r вынужден горизонтально "фильтроваться" через поленья прежде, чем попасть в глубину закладки /рис.240/. Поэтому дрова горят на решетке более активно, чем на поду. Вместе с тем, потоки воздуха X_r и X_p имеют одну и ту же физическую природу - они поступают на замещение всплывающих из костра горячих дымовых газов Γ_r . Более того, воздух X_p - это часть воздуха X_r , более легко проникающая в закладку. Точно так же появился бы дополнительный поток воздуха в закладку X_n при установке горизонтальной воздухоподающей трубы, углубленной в закладку. Поэтому, ни X_r , ни X_p , ни X_n не могут вырастать по величине более некоторого значения, определяемого скоростью выхода дыма, ни при какой укладке дров, даже при вертикальной укладке поленьев /рис.241/. Так что при горении костра кислорода может не хватать для дожигания всех летучих внутри костра, и летучие будут частично выходить наружу вверх в виде языков пламени над костром.

5.3.2. Поступление воздуха в топливник

В части подачи воздуха топливники печей кардинально отличаются от открытых очагов /классических костров/ ввиду появления самотяги при пространственных ограничениях горячей зоны /раздел 3.6/.

Костер даже в полностью замкнутой полости самопроизвольно засасывает /со всех боков "как попало"/ внутрь себя воздух ровно с таким же расходом X_r , с каким дымовые газы самопроизвольно всплывают вверх. Но в замкнутой полости у костра нет вокруг себя того неограниченного избытка свежего воздуха, какое есть в случае открытого /свободного/ костра. Создавая циркуляцию /рис.163 и рис.184/, костер задымливает полость, обедняя циркулирующий воздух X_r кислородом, что приводит к постепенному затуханию горения костра в замкнутой полости.

И лишь при появлении в полости вытяжки Γ_T /от тяги горячих газов в трубе/ возникает приточный поток X_T , обеспечивающий кислородом горящий костер /рис.242/. Этот поток X_T направлен из воздухоподающего отверстия в хайло /для стабильности желательно из одного отверстия в одно хайло/, и надо, чтобы поток X_T обязательно "задевал" горящие дрова. Величина потока X_T определяется не интенсивностью горения дров, а величиной тяги дымовой трубы /в отличие от потока X_r /.

Таким образом, помимо обычных для классических костров потоков воздуха на горение дров Γ_r и X_r , вентилирующих полости закладки дров, появляются дополнительные потоки в трубу Γ_T и X_T , вентилирующие полость топливника. То есть, помимо циркуляционной возникает и вентиляционная составляющая конвекции /раздел 3/. По аналогии с практикой вентиляции зданий, мы имеем, грубо говоря, случай общеобменной приточно-вытяжной вентиляции зала и локальной вентиляции помещения, встроенного в зал. Причем кратности вентиляции зала и встроенного помещения могут быть разными. В случае $X_r > X_T$ мы заведомо имеем режим самопродувки костра циркуляционным воздухом /модель замкнутой полости/, а в случае $X_r < X_T$ имеем /а можем и не иметь/ режим внешней продувки костра транзитным потоком за счет тяги трубы /модель полнопроточной полости/.

При наличии в поду решетки, часть приточного воздуха X_T проникает через решетку в виде потока X_p /рис.242/. Причем величина потока X_p не зависит от интенсивности горения дров, а определяется лишь величиной тяги трубы и величиной газодинамического сопротив-

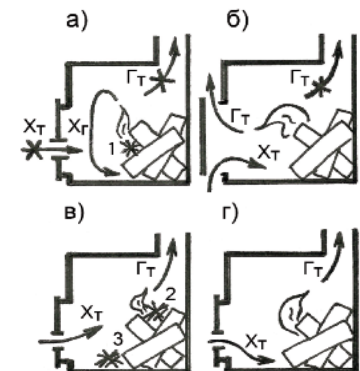


Рис.244. Подача воздуха в закладку при глухом поде: а - растопка в отсутствие тяги, б - горение в отсутствие тяги, в - растопка при наличии тяги, г - горение при наличии тяги.

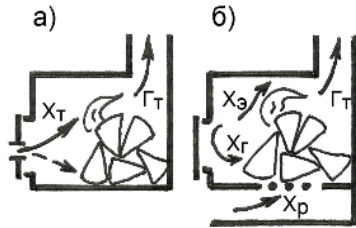


Рис.245. Сопоставление топливников с подом (а) и с решеткой (б) в части подачи воздуха в дрова.

ления закладки дров. При отсутствии тяги Γ_T поток X_p равен нулю /в отличие от рис.240/, поскольку зольник преимущественно отделен от полости топливника.

Если решетка занимает всю площадь дна топливника, то поток воздуха X_p (равный X_T при закрытии дверки топливника и при герметичности стенок топливника) может преимущественно обтекать закладку дров, поскольку она представляет значительное газодинамическое сопротивление /рис.243-а/. Дрова при этом горят умеренно с хорошим дожигом летучих, но КПД печи в этом режиме занижен из-за большого избытка воздуха. Поэтому полноразмерная решетка наиболее целесообразна в тесных топливниках, где закладка занимает все дно топливника.

Если решетка занимает центральную часть дна топливника (случай решетки ограниченных размеров по центру глухого пода, то есть в окружении периферийных пандусов), то практически весь воздух вынужденно проходит непосредственно через дрова /рис.243-б/. Поэтому дрова горят активно, но возможна нехватка кислорода в воздухе для сжигания летучих в пламени над дровами, то есть возможно дымление.

Если решетка занимает периферийные зоны дна топливника (вариант переднего и/или заднего расположения решетки в глухом поду), то для дров реализуется “режим глухого пода”, а для летучих - “режим решетчатого пода” /рис.243-в/. Дрова при этом горят медленно /медленней даже, чем в случае полноразмерной решетки/, а летучие эффективно дожигаются в условиях большого избытка воздуха. Целесообразно предусмотреть возможность регулировки поступления воздуха через решетки: например, задняя решетка перекрывается при растопке печи закладкой щепок на открытой передней решетке, а передняя решетка перекрывается при дожигании углей на открытой задней решетке.

В топливниках с глухим подом (без решетки) приток свежего воздуха организуется через воздухоподающие отверстия-заслонки на лицевой стороне печи и/или на дверке топливника и/или через приоткрытую дверку топливника /рис.244/. Наибольшие трудности ввода воздуха встречаются при первичной растопке печи пока нет тяги трубы. Растопка 1 начинает гореть в задымленном циркуляционном потоке воздуха X_T , причем “выскакивание” нагретого дыма Γ_T в трубу затруднено

обычно малым /в отличие от решеток/ проходным сечением воздухоподающих отверстий /рис.244-а/. Приоткрывая же дверку топливника, можно добиться быстрого разгорания растопки, но с большой вероятностью выброса дыма в помещение /рис.244-б/. Если тяга Γ_T и появится, то это не значит, что дрова будут быстро разгораться. Дело в том, что пока топливник холодный, холодный свежий воздух X_T не стремится идти по дну топливника в дрова, а пойдет выше дров прямо в трубу, поскольку в топливнике воздух пока тоже преимущественно холодный, и входящий воздух не будет тонуть в воздухе топливника /рис.144-в/. То есть быстрого разгорания дров можно ожидать как раз именно при верхнем расположении растопки 2, а при нижнем расположении растопки 3 вероятность быстрого разгорания дров не велика - придется брать дрова помельче, а остронаправленный в хайло поток свежего воздуха придется как-то разбивать-рассеивать по сторонам так, чтобы часть свежего воздуха попадала в низкорасположенную зону растопки. В разогретом же топливнике холодный воздух тонет и стелится по глухому поду, втекает под дрова /рис.244-г/ и при усилении тяги начинает интенсивно раздувать дрова остронаправленной затопленной струей по поду /по аналогии с обычным бытовым раздуванием углей костра ртом/.

Способ разжигания дров растопкой 2, расположенной в верхней части закладки дров, обычно называется “верхним розжигом”.

5.3.3. Подача вторичного воздуха

Особым случаем подачи свежего воздуха в топливник является мезозональный ввод в целях дожига летучих. Дело в том, что если в случае глухого пода свежий воздух беспрепятственно обтекает закладку дров сверху, то в случае решетчатого пода свежий воздух поступает в зону над дровами через слой горящих углей и неминуемо обедняется кислородом /рис.245/. При нехватке кислорода языки пламени над дровами удлиняются, меняют цвет с желтого на красный /бордовый/ и могут начинать дымить.

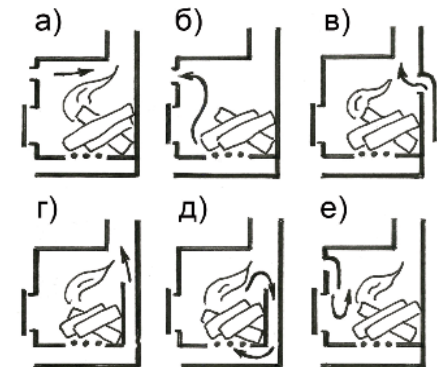


Рис.246. Способы ввода вторичного воздуха в топливник /см. текст/.

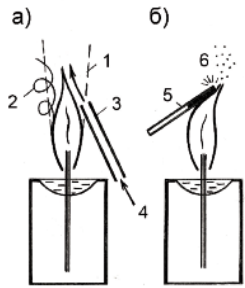


Рис.247. Захлаживание кончика пламени спутным потоком холодного воздуха не приводит к дымлению (а), а захлаживание кончика пламени добела раскаленным кончиком обугленной спички приводит к дымлению за счет ограничения доступа воздуха в оболочку горения (б). 1 - горячая зона, 2 - турбулентное перемешивание, 3 - трубка подачи воздуха, 4 - холодный воздух, 5 - обугленная спичка, 6 - черный дым.

Поэтому для дожигания кончиков пламен /см. раздел 5.9.1./ часто вводят дополнительный "верхний" воздух, обычно называемый "вторичным" /в отличие от "первичного воздуха", подаваемого внутрь закладки дров через решетку/. Вторичный воздух желателен делать регулируемым, поскольку он зачастую бывает необходим на ограниченный период времени /до 5-10 минут/, например, при подкидывании новых порций дров в раскаленную теплоемкую кирпичную топку, когда скорость выхода летучих /и высота пламен/ резко возрастает.

Отметим, что понятие "вторичного воздуха" является достаточно строгим лишь для топливников с решетчатым подом, поскольку в топливниках с глухим подом весь вводимый воздух и так является как-бы "верхним" /"вторичным"/. Причем этот "верхний" воздух как-то "сам собой" перераспределяется в топливнике на воздух, поступающий вглубь дров /"первичный воздух"/, и на воздух, поступающий на горение летучих /"вторичный воздух"/.

Вообще говоря, некий специальный "вторичный" воздух в подовых топливниках представляется излишним. Но иногда /по особым личным соображениям либо по недоразумению/ печники все же предусматривают ввод "вторичного" воздуха и в подовых печах, чаще всего надеясь повысить полноту сгорания летучих /хотя это обычно сопряжено со снижением КПД печи из-за увеличения тепловых потерь с отходящими газами/.

Наименее удачным представляется ввод вторичного воздуха (ВВ) в самую верхнюю часть топливника /рис.246-а/, поскольку он рассчитан только на экстремально высокие пламена /"залезающие" в хайло/, хотя и имитирует известный аналог - обдув кончика пламени свечи воздухом через трубку /рис.53, рис. 247/. Даже в случае раскаленного топливника, тяжелый холодный воздух не в состоянии преодолеть восходящее движение дымовых газов и не может утонуть глубоко внутри топливника к дымящимся кончикам пламен. Для того, чтобы холодный воздух пошел вниз /а не сразу в трубу, бесполезно разбавляя дымовые газы/ необходимо устремить его по инерции вдоль стенок топливника вниз напорной струей за счет тяги трубы. При этом самотяга топливника снижается /и даже исчезает/, уменьшается и высота пламен.

К недостаткам верхнего ввода относится также и то, что при малой тяге /например, при растопке печи/ дым может устремиться в высоко-

расположенные воздухоподающие отверстия /рис.246-б/. В целях предотвращения дымления через воздухоподающие отверстия /рис.246-б/, часто применяются "газовые затворы" в виде различного рода восходящих каналов вне топливника /рис.246-в/ или внутри топливника /рис.246-г/. Легко видеть, что и в этом случае не исключено дымление через восходящий канал на этапе растопки /при отсутствии тяги трубы/, поскольку образуются "сообщающиеся сосуды", затягивающие горячий дым в колена с холодным воздухом /рис.246-д/. Это приводит к выпадению в восходящих каналах конденсата и сажи, даже при попытках нагрева вторичного воздуха теплом из топки /поскольку газы в топливнике всегда горячее вторичного воздуха/.

Помимо вышеуказанного, к недостаткам подачи вторичного воздуха из зольника /рис.246-г/ можно отнести невозможность независимой регулировки расхода вторичного воздуха, поскольку открытие поддувальной дверки приводит к одновременному увеличению расхода и первичного, и вторичного воздуха. Тем не менее, целесообразность такой конструкции часто оправдывают тем, что вторичный воздух начинает подаваться, якобы, только при перекрытии живого сечения решетки углями, когда расход первичного воздуха неоправданно сокращается. Но ведь вторичный воздух не может полноценно заменить первичный воздух, тем более, что большой расход вторичного воздуха требуется чаще всего как раз тогда, когда и расход первичного воздуха велик /при наличии обилия углей/. Кроме того, в случае кирпичных топливников такие конструкции не могут заметно подогревать вторичный воздух, не могут также обеспечивать прочистку каналов от сажи.

Иногда "газовый затвор" выполняют в виде не восходящего, а нисходящего канала, в том числе и с совмещением с функцией обдува стекла дверки топливника для предотвращения ее загрязнения /рис.246-е/. При таком решении воздух подается в более низко расположенные зоны топливника, и выход дыма при растопке затруднен. Поэтому подача вторичного воздуха через дверку топливника в этом плане более предпочтительна внизу /рис.248-а/, нежели наверху /рис.248-б/.

Наиболее удачным представляется нижний ввод вторичного воздуха в топливник, причем со спутным обдувом языков пламени так, чтобы воздух не проникал в закладку дров /во избежание дополнительного разгорания поленьев и выделения летучих/, а лишь "лизал" пламя.

Ясно ведь, что горящую свечу лучше обдувать спутным потоком

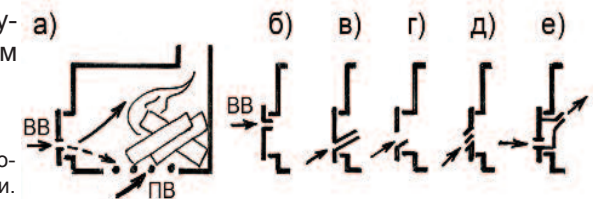


Рис.248. Поддача вторично-воздуха через дверку топki.

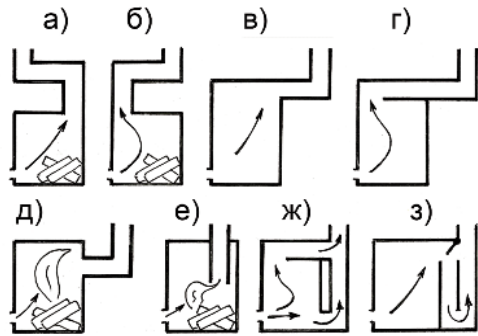


Рис.249. Различные расположения хайла /дымоотвода/ - места вывода дымовых газов из топливника.

воздуха - тогда не приходится опасаться ни ее погасания, ни ее дымления из-за "захолаживания" /рис.247-а/, поскольку холодный воздух не воздействует в этом случае на зону газификации в основании

фитиля. Так же и в случае дров желательно избегать проникновения вторичного воздуха в горящую на решетке закладку дров, но не для предотвращения ее погасания, а для предотвращения ее избыточного разгорания. Поэтому, по аналогии с рис.247-а, в дверке топливника можно выполнять воздухоподающие отверстия в виде ориентированных вверх под углом трубок /рис.248-в/, направляющих закрылков-кожухов /рис.248-г/ или жалюзи /рис.248-д/, в том числе и наличии систем экранирования дверки от излучения топки /рис.248-е/. Тем самым обеспечивается замечательное свойство "принципа вторичного воздуха" - возможность регулирования отдельной подачей воздуха в дрова и в пламя. При этом первичный воздух, подаваемый в глубь дров, преимущественно участвует в горении поленьев и их газификации /то есть выполняет как-бы роль "краника" в газовой плите/. А вторичный воздух, подаваемый в зону над дровами, участвует в горении летучих.

5.4. Вывод дымовых газов

Траектория движения газов в топливнике определяется не только геометрией ввода воздуха, но и геометрией вывода дымовых газов из топливника /в конвективную систему или сразу в дымовую трубу/. Действительно, если нет потока газа на выходе, то его нет и на входе.

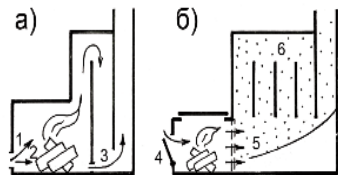
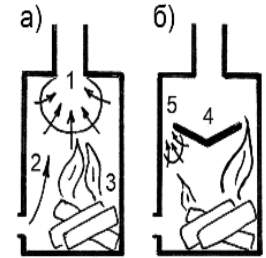


Рис.250. Траектории движения газов в подовом топливнике: а - поток воздуха 1, направленный в хайло, отклоняется вниз 2 /в дрова/ при появлении "прогара" 3, б - поток воздуха 4 распределяется равномерно по высоте топливника при оформлении хайла в виде вертикальной щели 5 (М.А.Смирнов).

Рис.251. Течения газов: а - хайло как сток 1 /"слив"/, засасывающий газы со всех сторон /и воздух 2, и пламена 3/, но в этом "равномерном" течении горячие потоки все же всплывают за счет архимедовых сил, б - при наличии рассекателя 4 приосевой сток заменяется пристеночным стоком в виде кольцевой периферийной засасывающей щели 5.



В начале растопки печи, пока нет тяги дымовой трубы, горячие дымовые газы способны лишь всплывать - только подниматься вверх и растекаться по потолкам /см. раздел 3/. Поэтому в топливниках выпуск дыма /хайло/ делают наверху /рис.249-а и рис.249-б/. Причем при растопке вверх поднимаются исключительно горячие газы. Они проникают в холодную пока дымовую трубу, там захолаживаются и останавливаются, "запирая собой" доступ новым порциям горячего дыма. Поэтому важно, чтобы непосредственно над хайлом шел именно вертикальный участок дымохода /"стояк"/, пусть невысокий 0,5 - 1 метр, лучше малотеплоемкий, в котором при растопке сразу же мог бы образовываться достаточно высокий самонапор горячих газов для проталкивания пробки охлажденных дымовых газов вверх. Вследствие этого, схемы с "трубными стояками" типа рис.249-а и рис.249-б представляются более предпочтительными при растопке, чем схемы типа рис.249-в и рис.249-г.

При возникновении тяги дымовой трубы хайло начинает всасывать как пылесос "все, что попало" /и холодное, и горячее/. При этом важно, чтобы этот "пылесос" затягивал так, чтобы свежий воздух устремлялся бы именно в область растопки /в разгорающуюся зону закладки дров/. Поэтому, при расположении воздухоподающих отверстий спереди печи, хайло предпочтительней располагать в задней части топливника /рис. 249-а/, а не в передней части /рис.249-б/, поскольку в этом случае будет больше воздуха попадать в растопку. При этом желательно иметь также и низко расположенные засасывающие отверстия 3 /"прогары"/, которые могут вступить в действие только при появлении тяги в дымовой трубе /рис.250-а/. Эти "прогары" /байпасы, шунты/ способствуют отклонению входного потока воздуха 1 вниз 2 к дровам. Также могут оказаться целесообразными особые конструкции заднего хайла, например, в виде вертикаль-

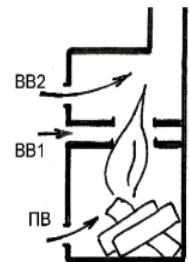


Рис.252. Схема низкого топливника с камерой дожига летучих.

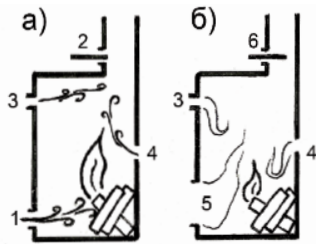


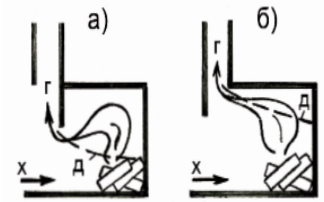
Рис.253. Режимы с одинаковым расходом воздуха: а - задвижка 2 на дымовой трубе открыта, подача воздуха дальнобойной струей через малое отверстие 1, б - задвижка 6 закрыта, подача воздуха ленивым потоком через большое отверстие 5. Далее: 3 - вторичный воздух, 4 - неплотности стенок топливника /подсосы/.

ной щели в задней части топливника, которая способствует равномерности течения дымовых газов по высоте топливника /рис.250-б/. При наличии в топливнике решетки подобные “прогары” и щели оказывают меньшую роль при растопке печи /в части подачи воздуха в дрова/, хотя и могут выполнять роль каналов прямого (летнего-холостого или пускового-растопочного) хода /рис.249-з/. Ясно, что любые прогары в режиме активного пламенного горения печи могут ухудшать чистоту дымовых выбросов печей /поскольку могут засасывать недогоревшие летучие/, но, тем не менее, такие специальные “прогары” до сих пор применяются для подогрева недостаточно прогреваемых стенок печи, не имеющих прямого контакта с высокотемпературной топкой /рис.249-ж/. Вообще говоря, эти “прогары” желательно оснащать регулируемыми задвижками.

Но в печах недостаточно только направить свежий воздух в дрова /или мимо дров/. Необходимо также добиться желательной дальнейшей траектории газов в виде горячего дыма. При анализе газодинамической обстановки в топливнике обычно исходят из того, что при наличии тяги воздухоподающие отверстия “вдувают” свежий воздух внутрь дальнобойной струей /как сопло/, а хайло высасывает любые газы “без разбора” как пылесос, причем без “дальнобойности”. То есть все газы устремляются во всасывающую воронку хайла равномерно по всем углам входа как в обычный сток-слив на дне сосуда с водой /см. рис.114/. Причем это вовсе не исключает возможность архимедова всплытия горячих струй /пламен/ в потоках холодных газов /рис.251-а/.

С возникновением в топливнике достаточной тяги, появляется возможность снижать высоту расположения хайла /рис.249-д, рис.249-е/. При этом возможно не только наклонять пламена, но и “класть” пламена горизонтально и даже опускать их вертикально вниз под решетку /как в топках “обратного горения” на рис.22 - не путать с обращенной тягой на рис.192/. Разумеется, необходимо принимать меры по обеспечению высокой степени сгорания летучих путем недопущения проникновений пламен в высокие колпаки /куда доступ холодного свежего воздуха затруднен/ и касаний пламен стенок канала за хайлом.

Рис.254. Открытые топливники: а - русская духовая печь, тяга трубы не оказывает влияния на процессы в топливнике, б - классический камин, тяга трубы оказывает влияние на процессы в топливнике.



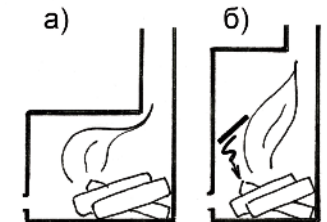
При снижении высоты хайла в высоком топливнике /рис. 249-д/ наверху появляются колпаки, усиливающие нагрев перекрыши в режиме разгорания дров, и снижающие нагрев перекрыши в режиме пламенного горения дров /когда скорость всасывания горячих дымовых газов в хайло настолько велика, что пламена попросту “не успевают” всплывать в колпак/.

Что касается стенок топливника, то в целях усиления их нагрева /а это является порой необходимым требованием/ можно установить некий рассекатель 4, который формирует периферийный кольцевой сток 5, засасывающий газы в пристеночную зону /рис.251-б/. Можно было бы, конечно, попросту сказать, что рассекатель 4 “раздвигает” газовые потоки, но при такой простейшей трактовке пришлось бы привлекать понятия газодинамических сопротивлений щелей, численные значения которых не всегда доступны. А “на языке всасывания” расход газа легко оценивается по перепаду давления и проходному сечению и уточняется с учетом всплытия горячего газа в холодном потоке.

Для уменьшения же нагрева стенок топливника /что также является порой желательным/ можно опустить центральное хайло, используя образовавшуюся низкую перекрышу как высокотемпературный излучатель, нагревающий лучистым теплом закладку дров /рис.252/. Для полного сжигания летучих в этом случае формируют камеру дожига над хайлом, вводя вторичный воздух в камеру дожига и/или в хайло.

Энергичность струй в топливнике определяется степенью разрежения в топливнике. При большом разрежении в топливнике из воздухоподающих отверстий 1 и 3 за счет высокого напора истекают дальнобойные струи /рис.253/, а через возможные неплотности 4 корпуса в топливник могут поступать недопустимо большие нерегулируемые

Рис.255. Низкий топливник обеспечивает лучший /иногда чрезмерный/ нагрев перекрыши и тем самым лучший прогрев дров тепловым излучением, но может не обеспечивать дожиг летучих (а). Высокий топливник обеспечивает дожиг летучих, но слабо прогревает перекрышу, что иногда требует установки дополнительных экранов-излучателей для подогрева дров (б).



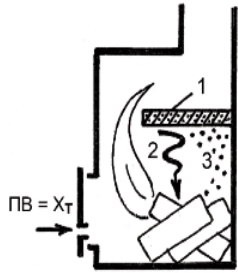


Рис.256. Разогрев дров в топливнике тепловым излучением: 1 - горизонтальный дымооборот /козырек/, в том числе из малотеплопроводного малотеплоемкого материала, 2 - лучистый поток тепла /инфракрасный/, 3 - "белый" дым.

паразитные натекания избыточного воздуха /протечки-подсосы/. Широко известны в быту случаи житейской небрежности содержания печей, когда неплотности в корпусе кирпичных топливников /в

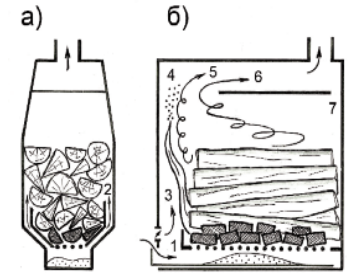
щелях дверок и вокруг дверок топливника, в зазорах под варочной плитой, в трещинах кладки/ не позволяют порой эффективно регулировать интенсивность горения дров открытием и прикрытием поддувальной дверки, особенно при малых расходах воздуха через поддувало, поскольку расход воздуха через неплотности слишком велик. Поэтому, для снижения разрежения в топливнике предусматривают регулируемые задвижки 2 на дымовой трубе /рис.253/. Имеются специально разработанные печи с герметичными /газоплотными - "air-tight"/ топливниками, преимущественно металлические, которые имеют малую степень паразитных неконтролируемых натеканий воздуха, что позволяет не только повышать температуру топки в пламенном режиме, но и эксплуатировать печи в тлеющем режиме горения дров.

5.5. Лучистый нагрев дров

В открытых очагах нет напорной подачи воздуха в дрова. И дымовая труба в открытых очагах /как создающая тягу в топливнике, так не создающая/ тоже не оказывает прямого воздействия на горящие поленья /рис.254/. Тем не менее, скорость горения дров в открытых (но перекрытых сверху) очагах может заметно превышать скорость горения дров в обычном костре в открытой атмосфере. Дело в том, что расположенные над костром элементы открытого очага /своды/ могут сильно разогреваться и своим лучистым теплом /ИК-излучением/ могут подогревать горящие поленья, ускоряя их газификацию.

Так же и в топливниках печей - дрова горят /газифицируются/ быстрее в окружении нагретых /раскаленных/ стенок, нежели в окружении холодных стенок. Вследствие этого, в холодных водоохлаждаемых топках /например, водогрейных котлов/ устанавливаются специальные раскаленные кирпичные или металлические элементы, разогревающиеся дымовыми газами и излучающие тепло на горящие дрова [117,118].

Рис.257. Схема металлической отопительной печи: 1 - первичный воздух под решетку, 2 - вторичный воздух из зольника вверх, 3 - вторичный воздух через дополнительное воздухозаборное отверстие, 4 - черный дым, 5 - сизый дым, 6 - белый дым, 7 - малое заднее отверстие в горизонтальном дымообороте /"прогар"/ для прогрева трубы при растопке.

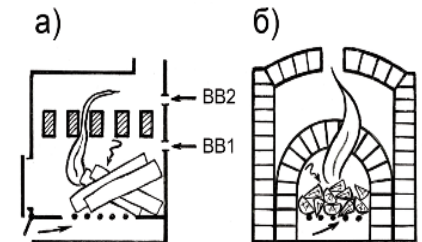


Более высокую температуру перекрыши и стен имеют низкие топливники. Поэтому в низких топках дрова могут гореть быстрее, чем в высоких топках /рис.255/. Тепловое излучение с низкого свода лежит в основе работы и пламенных /отражательных/ металлургических печей [38-41].

Излучающие элементы /перекрыши-своды, стены, радиационные панели-экраны, отражатели/ нагреваются в бытовых печах исключительно за счет тепла от сгорания самих дров - от излучения углей и от тепла пламен. Постепенно разогреваясь при растопке, эти излучающие элементы до поры до времени остаются холодными, потребляют тепло и представляют собой "холодное ядро" топливника, отбирающее тепло из топливника, которое могло бы пойти на разогрев дров для их ускоренного разгорания. Но затем, нагревшись, излучающие элементы, продолжая отбирая тепло из топливника, тут же отдают его дровам.

Конструктивно излучающие элементы могут выполняться по-разному, например, в виде низкорасположенных горизонтальных /рис.252/ или наклонных /рис. 255-б/ перегородок /пластин, рассечек/, дымооборотов-козырьков /рис.256-257/, плоских решеток /рис.258-а/ или решетчатых арок /рис.258-б/. Излучающие элементы могут изготавливаться как малотеплоемкими /быстронагревающимися/, так и высокотеплоемкими /для длительного сохранения способности нагревать дрова тепловым излучением, например, при новых закладках/. Иногда весь топливник утепляют /футеруют/ огнеупорным малотеплопроводным материалом /шамотом-ультралегковесом, минеритом и т.п./, чтобы максимально повысить температуру

Рис.258. Щелевые излучающие элементы в топливнике: а - шамотная или металлическая многощелевая решетка, б - свод многощелевой арочный /М.А.Соколов/.



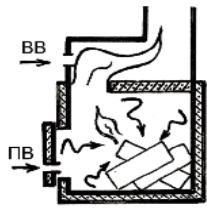


Рис.259. Раскаленный утепленный топливник как газогенератор - все тепло горения идет на разогрев и газификацию дров.

стен и перекрыши и создать в топливнике огневую обстановку, в какой-то степени имитирующую “микротопку” между горящими поленьями /рис.259/.

Но важен не просто себе факт наличия элементов, которые по задумке должны раскаляться внутри топливника и испускать тепловые лучи на дрова. Куда более важна реальная возможность нагрева этих элементов до необходимой температуры при штатной протопке. Влияние излучающих элементов начинает ощущаться при их нагреве до температур выше 300-400°C, когда лучистое тепло начинает испарять “белый дым” /см. раздел 1.3.5/, то есть туман продуктов пиролиза древесины /поз.3 на рис.256/. При температурах 400-500°C начинает сгорать сажа на стенках. И лишь при температурах излучающих элементов выше 500°C лучистое тепло становится способным воспламенять саму древесину /см. раздел 1.2.1/. Столь высокие температуры можно получить только при активном пламенном горении дров.

В связи с этим подчеркнем, что основной вклад в нагрев стенок топливника обычно дает тепловое излучение раскаленных углей на поверхности горячей древесины. Вклад конвективного и лучистого тепла от пламен бывает недостаточен для нагрева стенок и перекрыши топливника до температур выше 500°C. То есть топливник начинает особенно раскаляться лишь на этапе появления большого количества горящих углей, в том числе и в виде обугленных слоев на поверхности горячей древесины. И это несмотря на то, что пламена могут быть высокими, способными касаться и даже “облизывать” нагреваемые элементы /например, рис.258/.

Дело в том, что пламена в топливниках не обладают большими линейными скоростями /как, например, в заужающем хайле/ и не могут обеспечить высокий уровень конвективных тепловых потоков. И степень черноты пламен незначительна /не превышает 0,1/ и также не может обеспечить высокий уровень лучистых тепловых потоков. В то же время температуры “абсолютно черного” угля, горящего в “микротопках” между поленьями, могут достигать 1000-1400°C, что превышает реально достигаемые температуры стенок топливников, порой сравнимые с температурой деформационного и коррозионного разрушения металлоконструкций и кладок из красного кирпича 600-900°C. Так что даже малотеплоемкий топливник, а с ним и вспомогательные излучающие

элементы раскаляются далеко не сразу, а лишь при обугливание значительной доли поленьев и, более того, при развале-обрушении закладок горящих обугленных дров с раскрытием /обнажением/ раскаленных угольных внутренностей “микротопок” и с выходом лучистого тепла из закладки дров наружу в топливник.

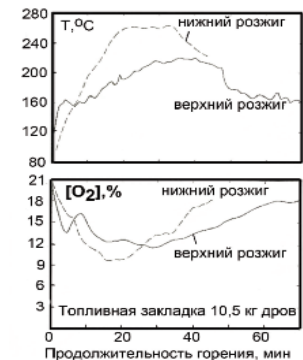
5.6. Переменные факторы огневого процесса

Конструкции бытовых печей чаще всего предусматривают контролируруемую регулировку только подачи воздуха /по месту ввода, расходу и направленности потока/. А турист, разжигающий костер на открытой площадке, не имеет даже такой возможности регулирования.

Тем не менее, возможности управления процессом горения дров находятся всегда. Имеется в виду, что всегда можно воспользоваться так называемыми “переменными факторами” процесса - подбором особых типов дров /видов древесины и древесных материалов, размеров поленьев, влажности/, способов укладки поленьев, особенностей розжига закладки дров, частоты и приемов подкладки новых порций дров. Например, верхним розжигом закладки дров можно добиться более быстрого прогрева дымовой трубы, но правда за счет увеличения продолжительности последующего горения основной закладки дров, что бывает порой тоже полезным житейским обстоятельством /рис.260/.

Указанные “переменные факторы” относятся к объективным параметрам топочного процесса, но носят во многом субъективный характер, поскольку являются прерогативой уже не производителя /печника/, а потребителя /истопника/. Производитель /разработчик/ может лишь рекомендовать /предписать/ тот или иной порядок протопки изготовленной /спроектированной/ им печи, но контролировать реальную практику эксплуатации печи он не в состоянии. Эти неконтролируемые “переменные факторы” могут непредсказуемо изменяться даже у одного и того же истопника на одной и той же конкретной печи и даже в ходе одной и той же протопки с одними и теми же дровами [119].

Рис.260. Временной ход изменения температуры дымовых газов и содержания свободного кислорода в дымовых газах /в трубе печи/ при верхнем и нижнем розжиге закладки дров в кирпичном футерованном топливнике печи с решетчатым подом /Е.В.Колчин/.



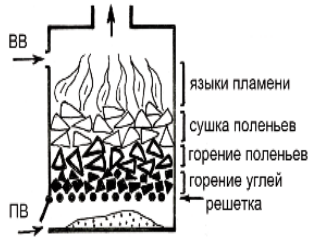


Рис.261. Принципиальная схема огневого процесса в дровяном топливнике с решетчатым подом.

“Переменные факторы” печного процесса зачастую преподносятся /даже в технической литературе/ как второстепенные или даже случайные детали, вносящие лишь “разнообразие” в печное дело. На самом же

деле, именно эти “переменные факторы” отражают собой всю глубинную суть топочного процесса на дровах и выступают как способ управления /регулирования и контроля/ процессом подачи горючего в очаг горения.

5.7. Дрова как топливо и как горючее

В дровяной печи нет того привычного “краника на газовой трубе”, которым регулируют скорость подачи газа в газовую горелку и которым определяют высоту пламени в газовой кухонной плите. Роль “краника” в дровяной печи как раз и играют “переменные факторы”, влияющие на скорость образования в топливнике горючих /углей и летучих/. И как только образовались эти горючие /угли и летучие/, так сразу они вступают в горение с тем количеством воздуха, которым располагает топливник.

Это горение образовавшихся горючих уже невозможно остановить “остужением” чрезмерно излишне поданным воздухом. Это горение можно остановить именно только нехваткой воздуха. Дело в том, что горючие /в процессе горения дров/ образуются за счет сильного нагрева дров, вследствие чего горючие образуются в раскаленном состоянии. Скорость химических реакций окисления горючих в этих условиях настолько высока, что очаг горения способен потребить сколь угодно большое /“любое”/ количество кислорода воздуха /даже при тлении/.

Скорость процесса горения ограничивается не скоростью химических реакций окисления /кинетических ограничений нет/, а скоростью поступления воздуха в очаг горения /диффузионное ограничение/ и скоростью образования самих горючих /термическое ограничение/. Чем больше мы подаем воздуха именно в очаг горения и чем больше тепла горения мы направляем на нагрев дров, тем больше мощность топливника.

Все это является следствием уже неоднократно отмечавшегося факта - дрова не являются “горючим”, а являются “топливом” /исходным энергетическим ресурсом/, а “горючее” /как реагент химической реакции/ получается из дров в ходе горения в результате пиролиза древесины.

Обычно при эксплуатации бытовых печей никто не вникает в абстрактные вопросы регулирования скорости подачи горючего в пламя. Воздух же подают в достаточно большом избытке, чтобы сжечь всё горючее, поступающее в очаг горения.

Такой подход - это удел простейших технологий, когда один из компонентов горения берется с избытком. Например, в костре или в кухонной газовой плите воздух имеется в неограниченном избытке, так что может регулироваться только подача топлива. А в газогенераторе имеется избыток топлива и регулируется только подача воздуха.

Конечно же, истопник дровяной печи стремится не просто “сжечь” топливо, но и получить некое оптимальное соотношение воздух-горючее, чтобы добиться тем самым вполне определенных потребительских целей /например, повышения КПД или снижения дымообразования/. Поэтому истопник вначале растапливает печь с большим избытком воздуха, а затем по мере возможности максимально ограничивает доступ воздуха, добиваясь “на глазок” хотя бы временного баланса воздуха и горючего.

Физическое понятие реакционной зоны теплогенерирующего аппарата подразумевает в самом общем случае наличие одновременной подачи и горючего, и воздуха. Причем в идеальной модели регулируемого процесса подразумевается непрерывный и дозированный ввод реагентов /в отличие от пожаров - нерегулируемых процессов горения/.

Но физического понятия “скорости подачи горючего” нет в печной практике. Даже физическое понятие “скорости подачи топлива /дров” заменяется чисто эксплуатационным понятием “расхода дров” /среднечасового, среднесуточного, среднегодового/. Ведь истопник порой вообще все дрова закладывает в топливник “сразу и разом”, не утруждаясь мыслями о последующей их судьбе. Истопник просто не в состоянии обеспечить подачу древесины в поленьях равномерно по времени - непрерывно и дозированно так, как, например, это делается при пневматическом вдуве пылевидного /размолотого/ каменного угля в топку промышленного котла или шнековой подачей сыпучих пеллет /гранул из измельченной и прессованной древесной массы/. Всё же дровяные печи на то и дровяные, что используют именно дискретно загружаемое крупнокусковое топливо - дрова /в поленьях/, а не какие-либо иные строго дозирующиеся виды топлива на основе переработанной древесины. Тем не менее, как и при сжигании угля в топке паровоза, при

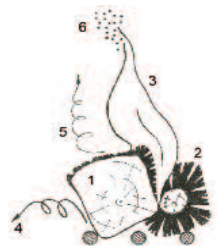


Рис.262. Неоднородность огневого процесса: 1- воспламеняющееся полено, 2 - горящее обуглившееся полено, 3 - пламя, 4 - белый дым с холодных поверхностей древесины, 5 - сизый дым с горячих /но не горящих пламенем/ поверхностей древесины, 6 - черный дым из недогоревших пламен /при нехватке воздуха/.

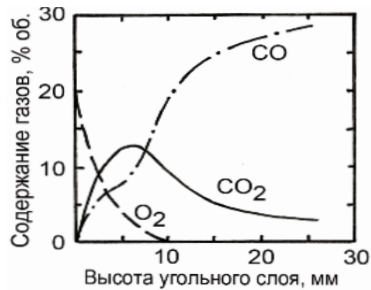


Рис.263. Высотное распределение объемных концентраций свободного кислорода O₂, окиси углерода CO и двуокиси углерода CO₂ в слое древесных углей, горящих на решетчатом поде. Размер частиц древесного угля 6,0-7,2 мм, скорость воздушного дутья 0,5 м/сек [117].

порционной подаче поленьев в огонь наблюдается процесс непрерывного горения, поскольку каждое полено горит

продолжительно /"долго"/. А это значит, что есть и некая непрерывная, пусть как-то и изменяющаяся во времени, скорость подачи горючих /углей и летучих/ в зону горения. Только истопник не может эту скорость подачи горючих контролировать /измерять/ количественно. Более того, истопник бытовой печи в принципе не может знать, сколько древесины горит в печи в каждый момент времени. И тем более, истопник понятия не имеет, какие конкретно химические вещества, выделяемые из поленьев, горят в печи в данный момент времени и в каком количестве.

В ходе конструирования дровяных печей и в ходе их эксплуатации при попытках объективно учесть физические механизмы поступления горючего в зону горения неизбежно возникают две группы соображений. Во-первых, далеко не все дрова в закладке вступают в реакцию горения "сразу и разом" - некоторые заложенные в топливник поленья до поры до времени лежат в топливнике "про запас мертвым грузом". Дрова в топливнике разгораются постепенно /во времени/ и неравномерно /в пространстве/. Поэтому под "скоростью подачи топлива" /но не дров! и не горючего!/ можно понимать скорость распространения фронта воспламенения "от одного полена к другому", то есть скорость постепенного вовлечения дров в огневой процесс.

Во-вторых, как мы уже отмечали с самого начала /см. раздел 1.1/, горят не сами по себе дрова /топливо/, а именно горючее - продукты термического разложения древесины, то есть горючие газы пиролиза древесины /летучие/ и древесные угли. Поэтому под "скоростью подачи горючего" в огневой процесс надо понимать не скорость распространения пламени по закладке дров, а скорость выделения горючих компонентов из ансамбля воспламенившихся поленьев.

Таким образом, регулировка интенсивности огневого процесса "переменными факторами" может осуществляться либо "скоростью поступления топлива" /например, размером дров или скоростью подачи дров/ и/или "скоростью поступления горючего" из топлива /например, влаж-

ностью дров/. Регулировка "переменными факторами" может производиться одновременно "заранее" /например, специальной укладкой поленьев перед началом топочного процесса/, а может производиться в ходе топочного процесса оперативно и непрерывно, например, периодической шуровкой. В печном быту "переменные факторы" обладают многообразием. Так, в русской деревенской жизни приемы укладки дров в духовую печь передавались веками из поколения в поколение.

5.8. Модель микротопок

Несмотря на "вакханалию огня" в топке, основной процесс горения дров происходит все же в микротопках между горящими обугленными поленьями /см. раздел 5.2/. Пламена же над дровами, которые в быту часто отождествляют с огнем в печи, являются лишь отголоском /сопровожающим явлением/ процессов, происходящих в микротопках внутри закладки дров, и являются свидетельством о неполном догорании горючих газов в микротопках. Относительная доля тепловыделений в микротопках внутри закладки дров может многократно превышать долю тепловыделений в пламенах над дровами.

Действительно, если взять за основу анализа схему газогенератора с прямым процессом газификации /рис. 16/, то становится понятным, что огневой процесс может, в принципе, вообще не выходить за пределы закладки дров "наружу" в виде пламен [8,120]. Также ясно, что если на выходе из газогенератора /в зону выше дров/ подать дополнительный воздух /условно считай "вторичный" воздух - ВВ/ и поджечь в нем остывшие продукты газогенерации /имеющие на выходе из дров температуру 100-150°С/, то возникнут пламена "как в печке". Только при случайных затуханиях всех пламен над дровами /например, после временного прекращения подачи воздуха/ горючие газы придется вновь поджигать "спичкой" /как в газовой



Рис.264. Распределение скоростей воздуха по сечению модельного проточного цилиндрического аппарата, заполненного шарообразными зернами. Диаметр аппарата 185 мм, диаметр внутренней центральной трубки 62 мм, высота слоя зерен 135 мм, диаметр зерен 5,9 мм [121].

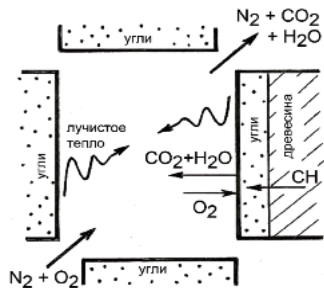


Рис.265. Схема огневого процесса в "микротопке".

кухонной плите/, поскольку пламя не может ни вспыхнуть само собой над дровами, ни проскочить вниз внутрь закладки дров к раскаленным углям /как источнику воспламенения/, потому что в верхних слоях дров нет кислорода, необходимого для горения.

Поэтому в топках печей делают закладку дров существенно более низкую, чем в газогенераторах так, чтобы пламена /возникающие в нижних слоях закладки/ выходили бы за пределы дровяной закладки вверх и чтобы продолжали гореть над дровами за счет остаточного кислорода, "проскакивающего" через закладку дров /рис.261/.

Таким образом, при анализе коллективного процесса горения дров приходится рассматривать не только динамику прогорания поленьев /закладываемых сверху и превращающихся в угли внизу/, но и динамику выгорания кислорода в воздухе /поступающего снизу через решетку и выходящего из закладки дров вверх в виде дымовых газов/. Причем, если дрова в процессе горения неминуемо превращаются в угли и полностью сгорают /если не проскакивают через решетку в зольник/, то кислород воздуха в печах всегда не выгорает полностью, что и отличает топку печей /камер сгорания/ от газогенераторов /камер газификации/.

Этот "противоточный" процесс горения дров встречно потоку воздуха характерен для топливников с решетчатым подом и отличается тем, что чем в большей степени прогорела /обуглилась/ горящая древесина, тем в большей концентрации кислорода в воздухе она горит. То есть начальные стадии горения /обугливания/ древесины происходят в газовой среде, обедненной кислородом, а конечные стадии горения древесины /углей/ происходят в газовой среде, богатой кислородом /в воздухе/.

В случае топливника с глухим подом при верхнем розжиге закладки дров может не наблюдаться разгорание /обугливание/ дров встречно воздушному потоку /рис.244/. А в топках пиролизного типа /рис.22/, с выпуском дыма вниз через решетчатый под, разгорание закладки дров происходит попутно воздушному потоку, то есть в зону углей поступает уже обедненный кислородом воздух. В случае же низкой закладки дров, в частности, однослойной /рис.262/, поленья разгораются, горят и прогорают фактически в атмосферном воздухе с нормальной концентрацией кислорода. Так что анализ процесса коллективного горения дров

должен учитывать специфику разгорания поленьев в условиях конкретных распределений концентраций кислорода в закладке дров.

Отметим, что в печном быту порой для простоты "воздухом" условно называют ту газовую среду, содержащую кислород, которая изначально была атмосферным воздухом и которая постепенно превращается в дымовые газы. Ввиду особой физической важности этот, казалось бы, крайне узкоспециализированный термин внесен в перечень даже чисто общегуманитарных /"бытовых"/ энциклопедий [122] - газы, заполняющие внутритопочное пространство, официально названы "газовой средой печи" /атмосферой печи/.

5.8.1. Горение в микротопках

Процессы коллективного горения сложны для анализа не только из-за своей неоднородности в пространстве и времени, но и из-за своей переменной многофакторности микротопок: мелкие дрова или крупные, сухие дрова или мокрые, плотно уложенные дрова или рыхло уложенные, высокая закладка дров или низкая, есть ли шуровка /подправление кочергой/ дров и углей или шуровкой пренебрегают, разваливаются ли закладки дров при прогорании или этого не допускают и т.д. Поэтому печники вынуждены прибегать к упрощенным моделям процесса, в частности, к качественным оценкам "с различных точек зрения".

Во-первых, имеется в виду анализ с точки зрения динамики послойного выгорания /обугливания/ поленьев в воздухе /рис.261/. Во-вторых, возможно проследить процесс с точки зрения потока кислорода воздуха, поступающего через решетку и постепенно потребляемого в слоях горящих дров. В-третьих, можно придерживаться "точки зрения очага горе-

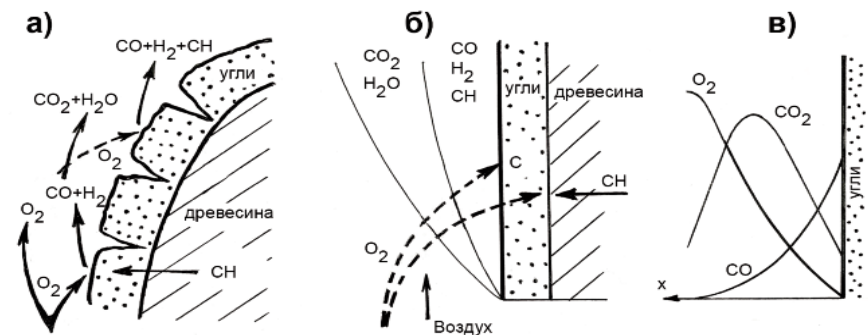


Рис.266. Горение углей и летучих на поверхности обугленного слоя древесины.



Рис.267. В горячих газах микротопок между поленьями горячие газы пламен всплывают медленнее /или вообще не всплывают/.

ния”, в который непрерывно поступает и горючее, и окислитель. Имеются также и иные, чисто субъективные или чисто потребительские подходы, в частности с “точки зрения истопника”, призванного как-то решать вопросы регулирования горения дров в топливнике. Все эти подходы осознают один и тот же физи-

ческий процесс горения в микротопках, но отличаются формальной “человеческой” логикой рассуждений /удобством мышления/ и, в принципе, должны давать один и тот же результат анализа.

Рассмотрим процесс горения с точки зрения “судьбы” воздуха, поступающего в горящую закладку дров снизу через решетчатый под топливника. Непрерывный поток воздуха последовательно проходит через ряд зон горения дров с разными состояниями горящих поленьев /рис.261/. Как и почему образовались именно такие зоны горения в этой модели не обсуждается, наличие таких зон воспринимают “как исторически сложившуюся объективную данность”. Механизмы формирования этих зон будут уточнены отдельно в разделе 5.6.5 при обсуждении вопросов горения с точки зрения “судьбы” обугливающейся древесины.

Сначала воздух проходит через слой горящих углей. Этот слой углей является по сути “сердцем” огневого процесса /и в печном топливнике, и в газогенераторе с прямым процессом газификации/. Именно он образует горючие /угли и летучие/ из топлива /из дров/, греет всю закладку дров снизу. И именно он в первую очередь потребляет кислород из поступающего через решетку воздуха и нагревает газы по экзотермической химической реакции $C + O_2 = CO_2 + 97650$ ккал/кг-моль [123].

Экспериментальные исследования слоевой топки на решетчатом поде показали, что свободный кислород исчезает уже при толщинах слоев древесного угля, равных примерно 1,5-2,0 “диаметрам” /поперечным размерам/ угольных гранул /рис.263/. В случае же обугливающих дров выработка свободного кислорода происходит на больших толщинах слоев, равных примерно 5-10 “диаметрам” /поперечным размерам/ поленьев, что объясняется пониженной температурой микротопок в горящих дровах /по сравнению с горящими углями/.

Как свидетельствуют экспериментальные исследования, даже весьма упорядоченные слои неподвижных крупных гранул-зерен не могут обеспечить равномерного пространственного распределения скорости транзитно протекающего воздуха /рис.264/. Линейные скорости воздуха в разных точках поперечного сечения неподвижного слоя могут отличаться в несколько раз, что объясняется самопроизвольным образованием случайных каналов в толще слоя. Поэтому, можно было бы ожидать, что и высотные распределения концентраций кислорода /рис.263/ в разных точках слоя будут существенно отличаться. Однако, выяснилось, что скорость химической выработки кислорода из воздуха слабо зависит от линейной скорости воздуха в угольном слое. Дело в том, что чем больше скорость воздуха в порах-каналах между частицами угля, тем сильнее обдув горячей поверхности угля, тем сильнее разгорается уголь, тем быстрее протекают реакции окисления. И малые времена контакта воздуха с углем при больших скоростях компенсируются большими скоростями выработки кислорода. Так что распределения концентрации кислорода в слое /рис.263/ слабо зависят от линейной скорости дутья воздуха через слой. Во всяком случае, в топках паровозов и паропроводов не корректируют толщину слоя угля при изменении скорости подачи воздуха. Но добиваются именно ровности верхней /свободной/ поверхности слоя угля, чтобы не было “ям” на поверхности топлива, где могли бы проскакивать потоки невыработанного кислорода [117].

При больших толщинах слоев образовавшаяся двуокись углерода начинает при повышении своей концентрации восстанавливаться раскаленным углем до окиси углерода с потреблением тепла по эндотермической химической реакции $C + CO_2 = 2CO - 38790$ ккал/кг-моль. В результате толстый угольный слой разогревается по суммарной реакции $2C + O_2 = 2CO + 58860$ ккал/кг-моль. Иными словами, с увеличением толщины угольного слоя теплотворная способность угля /в части разогрева самого себя, то есть разогрева самого угольного слоя/ уменьшается теоретически /в расчете на чистый углерод! с 8138 ккал/кг до 2453 ккал/кг, но зато появляется теплотворная способность от сгорания окиси углеро-

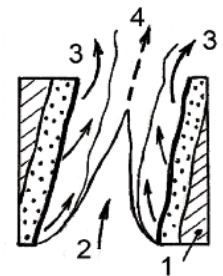


Рис.268. В микротопках между поленьями воздух течет в окружении горячих продуктов пиролиза древесины, вследствие чего образуется пламя воздуха, горящего в горячем газе: 1 - древесина обугленная, 2 - воздух, поступающий в микротопку, 3 - горячие газы пиролиза /газообразные продукты термодеструкции древесины/, 4 - продукты сгорания /дымовые газы/.

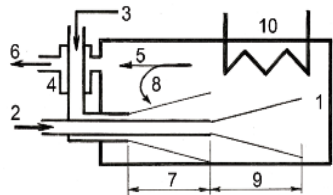


Рис.269. Аппарат с беспламенной газовой горелкой FLOX: 1 - камера сгорания, 2 - подача газа, 3 - подача воздуха, 4 - подогрев воздуха, 5 - отходящие продукты сгорания, 6 - выхлоп, 7 - зона смешения воздуха с продуктами сгорания, 8 - циркулирующие продукты сгорания, 9 - зона горения газа, 10 - водотрубный котел.

да над слоем горящих углей, достигающая 5685 ккал/кг. То есть толстые слои углей раскаляются меньше, чем тонкие. Но зато из этих толстых слоев углей выделяются газы, содержащие окись углерода, которая может сгорать в дальнейшем, выделяя дополнительную тепловую энергию.

Отметим, что по стандартам ракетной техники [14] теплота образования двуокиси углерода из элементов составляет 7807 ккал/кг, в отличие от 8138 ккал/кг, принятого в печной литературе [123]. В реальности же древесный уголь кроме углерода содержит остаточные количества водорода, кислорода, азота и минеральных золистых примесей. Поэтому теплотворная способность древесного угля может снижаться до $Q = 7090$ ккал/кг (и до 2179 ккал/кг при сжигании до CO, что ниже уровня теплотворной способности даже мокрой древесины 2400 ккал/кг, см. рис.8). Так, кучный древесный уголь, получаемый сжиганием древесины в присыпанных землей ямах, содержит лишь около 90% общего углерода, а уголь, получаемый при сжигании дров в печах содержит углерода еще меньше [117]:

Содержание	C	H	O + N	Q
Кучный уголь	91	2	7	7695 ккал/кг
Печной уголь	80	4	16	7090 ккал/кг

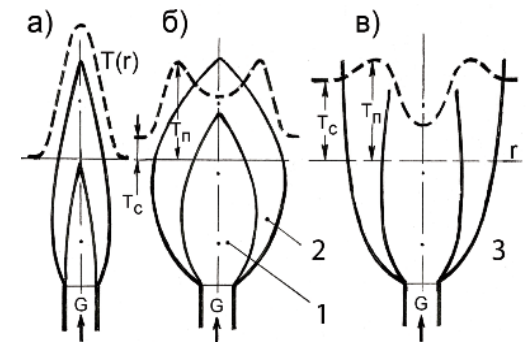
Летучие примеси из древесного угля удаляются лишь при прокатке до 900°C и выше.

Воздух в микротопке реагирует с поверхностью углей диффузионно, то есть молекулы кислорода диффундируют к поверхности углей в среде азота, а навстречу молекулам кислорода диффундируют молекулы двуокиси углерода /рис.265/. Одна молекула кислорода O_2 порождает одну молекулу двуокиси углерода CO_2 , так что сумма объемных концентраций молекул кислорода и двуокиси углерода всюду сохраняется постоянной 21%. Но если при окислении углерода на поверхности углей образуется окись углерода, то на одна молекула кислорода O_2 порождает уже две молекулы CO, то есть объем газа возрастает, и появляется поток газа от поверхности углей, который называется “стефановским потоком”. Молекулы кислорода при этом вынуждены диффундировать навстречу газовому потоку. Этот встречный газовый поток усиливается при выходе через угольный слой продуктов пиролиза древесины, услов-

но обозначаемых СН /рис.266-а/. В результате на поверхности углей может образоваться слой /“подушка”/ отходящих летучих, не допускающий подхода молекул кислорода к поверхности углей /рис.266-б/. Кислород уже вынужден реагировать с горючими летучими в объеме над поверхностью углей в виде диффузионных пламен. В результате, выгорание поверхности углей на горячей полуобугленной древесине /выделяющей летучие/ происходит медленнее, чем выгорание поверхности древесного угля /полностью обугленной древесины, не выделяющей летучих, рис.266-в/. Так что на горячей древесине обугленный слой постепенно утолщается. В топливнике накапливаются несгоревшие угли. Ясно, что поток воздуха, сдувающий “подушку” летучих, способствует повышению скорости поступления кислорода к поверхности углей и ускорению выгорания углей с поверхности горячей древесины.

Не углубляясь в детальное рассмотрение этого диффузионного процесса поверхностного горения, напомним, что при горении древесины угольный слой на ее поверхности растрескивается /см. раздел 5.6.5/. Летучие начинают истекать из обгоревшей древесины не равномерным потоком-фронтом, а преимущественно отдельными локальными “струями из расщелин” в виде языков пламен /рис.267/. При этом молекулы кислорода приобретают возможность подходить в промежутках пламен к раскаленной поверхности углей /разогреваемой излучением от пламен и от стенок микротопки/ и реагировать с углеродом. Однако, горячие газы пламен затрудненно всплывают в горячих газах микротопки /из-за уменьшения подъёмных сил Архимеда/, не удаляются быстро вверх, а накапливаются у поверхности в виде “неких огненных облаков” и могут затруднять доступ кислорода к поверхности углей. Эти “огненные облака” могут сливаться воедино в “маревое огня” /см. далее раздел 5.8.2/.

Рис.270. Форма ламинарных пламен: а - обычное диффузионное пламя в холодном воздухе /см. раздел.1.3.3/, б - “раздутое” пламя в разбавленном воздухе, в - “раскрытое” пламя в горячем сильно разбавленном воздухе. T_c - температура окислительной среды внутри камеры сгорания, T_n - температура горения в оболочке пламени, 1 - зона горючего газа, зона продуктов сгорания, 3 - зона газовой среды внутри камеры сгорания.



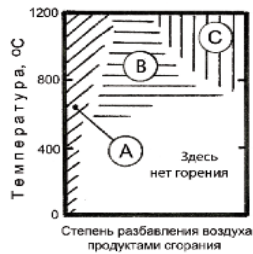


Рис.271. Температурные режимы ламинарных диффузионных пламен: А - зона обычных стабильных пламен газа в воздухе, В - зона нестабильных пламен, С - зона стабильного "беспламенного" горения [128].

Отметим еще одну качественную особенность. Воздух втекает в микротопку и оказывается в окружении потоков раскаленных летучих - горючих газов /рис.268/. Реакция горения в виде пламени /обычно малоаметного голубого/ возникает на границе воздушного потока. Получается факел воздуха, горящий в горючем газе. Такие пламена наблюдаются и в печах "медленного горения" /тления/ при дожиге летучих потоками горячего вторичного воздуха.

5.8.2. Форма пламен в микротопках

Микротопка между поленьями, как и "настоящий топливник", имеет свою подачу воздуха, "свои дрова, свои угли и свои пламена". В начальной стадии разгорания дров, когда обугленные стенки микротопок еще сильно не раскалились и когда в микротопках много /избыточно/ воздуха, пламена в микротоках имеют обычный вид диффузионных факелов /порой даже голубых/, бьющих из расщелин обугленной древесины. Но потом, по мере разгорания дров, потоки летучих увеличиваются, и пламена заполняют весь объем микротопок, выходят за пределы микротопки и струятся между вышележащими поленьями вверх.

Поскольку в микротопку поступает воздух, но из микротопок истекают горячие потоки летучих в виде пламен, это означает, что горение в "развитых" микротопках происходит в условиях нехватки воздуха /при коэффициентах избытка воздуха "альфа", меньших единицы/. При этом горение в микротопках /а по сути местообразование высоких пламен между горячими поленьями/ может выглядеть не как обычное диффузионное пламя /см.раздел 1.3.2/, а как некое объемное "пылкое и жаркое" бесформенное свечение /"стоячее марево"/.

Одну из причин образования "беспламенного горения" мы называли - это медленность свободного всплывания пламен в горячей окружающей среде. Но есть еще и иные причины - недостаточность поступления воздуха в микротопки, а также высокие температуры в микротопках.

Механизм образования "беспламенного полыхания" /огненного марева/ в микротопках можно пояснить на примере принципа работы про-

мышленной газовой горелки "беспламенного горения" FLOX® /рис.269/. Такая горелка была изобретена в ходе исследований по экономии тепла в период энергетического кризиса. Была сделана попытка утилизации сбрасываемого тепла отходящих газов путем нагрева ими подаваемого в горелку воздуха [124]. В ходе экспериментов случайно с удивлением выяснилось, что в горячих /1000°C и выше/ топках при предварительном нагреве подаваемого в горелку воздуха /выше 650°C/ видимые резкие очертания пламени исчезали - пламя превращалось в размытое диффузное свечение. Причем резко снижались температуры в зоне горения, что предотвращало образование вредных для окружающей среды окислов азота (<http://www.flox.com>). Уникальные экологические показатели техпроцесса и предопределили коммерческий успех проекта.

Суть процесса "беспламенного горения газа" следующая. В камеру сгорания 1 /топку/ технологического аппарата подается горючий газ 2 и воздух 3. Воздух предварительно подогревается в теплообменнике 4 /рекуператоре - экономайзере/ отходящими продуктами сгорания 5, которые после охлаждения сбрасываются в атмосферу 6. Подогретый воздух смешивается 7 с циркулирующими в камере сгорания продуктами сгорания 8 так, что газ 2 горит в зоне горения 9 в горячем "разбавленном" воздухе /то есть в воздухе, обедненном кислородом/.

В дальнейшем выяснилось, что нагрев воздуха, подаваемого в горелку, в общем-то не обязателен. Но разбавление воздуха горячими продуктами сгорания и высокая температура топки /камеры сгорания/ являются необходимыми условиями беспламенного горения. Как мы уже отмечали, разбавление воздуха инертным газом приводит к увеличению размеров пламени горелки - "раздуванию" оболочки факела горения /рис.46/. Это объясняется тем, что в разбавленном воздухе /то есть в воздухе, обедненном кислородом/ диффузионный поток молекул кислорода в оболочку пламени сокращается, а значит должен сокращаться и диффузионный поток молекул горючего газа в оболочку /например, поток молекул метана CH_4 на рис.41-а/. А это может быть

Рис.272. Дровяные пламена: а - обычные пламена с избытком воздуха, б - "раздутые" пламена при малых избытках воздуха, в - топка с камерой предварительного сгорания /предтопкой, газогенераторной камерой, форкамерой, полупрозрачной оболочкой/.

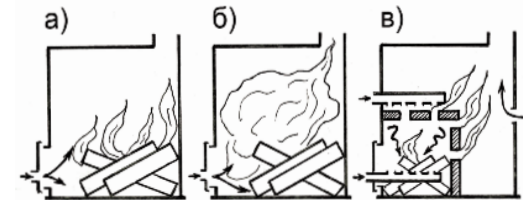




Рис.273. Диаграмма Кирша: 1 - расход воздуха, обеспечиваемый тягой дымовой трубы, 2 - расход воздуха, потребный на горение дров в топке [117, 118].

достигнуто либо разбавлением горючего газа инертным газом, либо уменьшением градиента концентрации горючего газа внутри факела, то есть увеличением диаметра оболочки факела. Фактически речь идет об увеличении площади контакта разбавленного воздуха с

горючим газом так, чтобы скорость поступления кислорода снаружи в оболочку пламени соответствовала скорости поступления горючего газа в горелку, то есть внутрь оболочки. Горючий газ, не успевая прореагировать с разбавленным воздухом, попросту "раздувает" оболочку. Но при этом плотности потоков реагентов /скорости поступления кислорода и горючего газа в единицу площади оболочки/ падают, что приводит к снижению тепловыделения в единицу площади оболочки и к снижению температуры горения в оболочке.

Так, легко убедиться, что резкое прикрытие поддувала в герметичных топках /при отсутствии значительных паразитных натекааний воздуха/ приводит к увеличению высоты пламени над дровами. Но при этом температура пламени снижается - цвет пламени из белого превращается в желтый, а потом и в красный. А раз снижается температура пламени, то снижаются и скорости химических реакций горения - горючие газы начинают сгорать не полностью, появляются неустойчивости горения, возникает дымление пламени. Всем известны красные дымящиеся пламена в горнилах русских печей при больших закладках быстрогорящих дров /при большой нехватке воздуха/. То есть при "красных" температурах порядка 700°C скорости реакций окисления оказываются уже недостаточными для поддержания пламени, тем более в разбавленном воздухе с низкой концентрацией кислорода. Вот тут-то и могут спасти положение высокие температуры топки /то есть температуры стенок топки и температуры продуктов сгорания в топках/. Если температуры топки велики /порядка 1000°C и выше/, то значит, что воздух и газ, поступающие в топку, могут нагреться до температур начала реакций окисления и могут начать реагировать даже без заметного саморазогрева смеси, правда за большие времена протекания реакции. И за эти большие времена газ и кислород могут смешаться по всему объему камеры сгорания, и эффект реакции проявится как размытое диффузное свечение.

Обычное "нормальное" пламя газа в воздухе выглядит как узкое сетеложелтое /рис.270-а/. При разбавлении воздуха /то есть при низких альфа, но все же больших единицы/ пламя "раздувается" /рис.270-б/. При дальнейшем разбавлении воздуха пламя становится "рваным", может отрываться от горелки, дымить, погасать. Но при высокой температуре пламя стабилизируется, "раскрывается", как-бы выпуская в пространство облако газа, затем "медленно" /беспламенно/ окисляющегося в горячем разбавленном воздухе /рис.270-в/. Эти "облака газа" выходят за пределы микротопок и образуют пламена над дровами.

Обычный вид газовых пламен в атмосферном воздухе может наблюдаться при любых температурах топки /зона А на рис.271/. При разбавлении же окружающего воздуха инертными газами /то есть при обеднении воздуха кислородом/ пламя становится нестабильным /зона Б/, но может стать устойчивым при высокой температуре топки /зона С/.

Так, в негерметичных топливниках наблюдаются обычные пламена в виде горячих / $1200-1400^{\circ}\text{C}$ / "языков огня", высота которых возрастает при увеличении доли подачи воздуха под дрова. Доля воздуха, направляемая в зону над дровами, "сажает" пламя - снижает высоту пламен /рис.272-а/. А вот в герметичных топливниках /"газоплотных"/, где имеется возможность дозированного сокращения подачи воздуха, пламена приобретают "раздутый" вид /рис.272-б/. Эти ленивые прозрачные пламена, горящие по сути в разбавленном воздухе, являются холодными / $1000-1200^{\circ}\text{C}$ /, но очень красивыми, а потому широко используются в декоративных герметичных печах-каминах и каминных вставках. Печи при этом могут обладать и повышенной чистотой горения /малым содержанием окиси углерода и сажистых частиц в дымовых газах/.

Но, конечно, температуры стенок порядка 1000°C , необходимые для режимов стабильного "беспламенного горения", в обычных отопительных и декоративных изделиях не достигаются. Явления типа "беспламенного горения" могут наблюдаться в топливниках банных печей-каменок с нагревом камней в пламени /режимы "камни в огне"/.

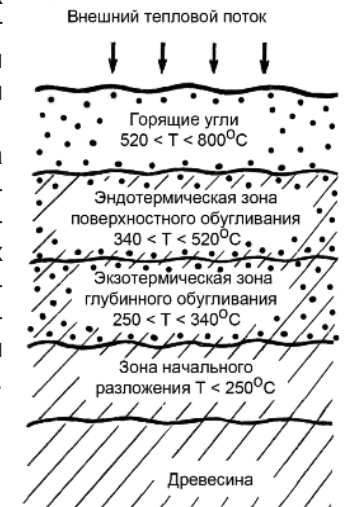


Рис. 274. Разрез обугливающейся древесины.

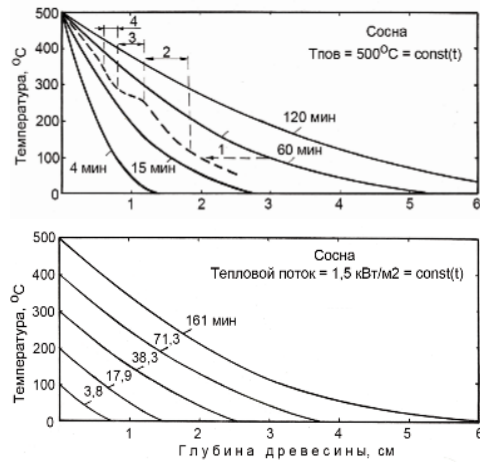


Рис.275. Расчетные данные по динамике прогрева абсолютно сухой древесины в глубину поперек волокон в гипотетическом предположении отсутствия пиролиза: а - волна тепла при неизменной температуре поверхности, б - волна тепла при неизменном потоке тепла. 1 - переход к обугливающейся древесине, 2 - эндотермическая зона начального разложения древесины, 3 - экзотермическая зона разложения целлюлозы /глубинного обугливания/, 4 - эндотермическая зона поверхностного обугливания. Цифры на кривых - продолжительность прогрева в минутах.

Явления типа “беспламенного горения” реализуются также в

топливниках с раскаленными /теплоизолированными/ камерами газогенерации /форкамерами по С.И Несову, “полупрозрачными оболочками” по С.М.Арчибасову и др./ с коэффициентами избытка воздуха менее единицы /рис.272-в/. Такие камеры “предварительного сжигания” /предтопки/ не испытывают влияния паразитных натеканий /так называемых подсосов, присосов, засосов/ воздуха через неплотности топливника.

По сути, режимы газогенерации происходят во всех печах именно в раскаленных микротопках. По мере разогрева стенок микротопок потребность воздуха увеличивается, и далеко не всегда весь потребный воздух удается ввести в микротопки. Приходится “шуровать” закладку дров для доступа воздуха в микротопки. Многие видели, какие высокие /порой дымные/ пламена “выскакивают” из дров при раздвиганиях горящих поленьев, а также при самопроизвольных обрушениях закладок горящих дров. Но и разгорание дров без шуровки может приводить к серьезному сокращению коэффициента избытка воздуха /рис.273/. И в случае чрезмерного перегрева топливника может быть достигнут такой режим газогенерации, когда пламена горящих летучих “выскакивают” из раскаленной печи через трубу в открытую атмосферу.

Фактически в этом явлении выхода летучих за пределы закладки дров происходит смычка принципов печей и газогенераторов. Только в газогенераторах не хватает воздуха, и летучим попросту не в чем гореть над дровами. Но причина столь сильного /во всяком случае, визуального/ различия процессов горения в газогенераторах и в топливниках печей не только в высоте закладки дров /что приводит в газогенераторах к полной

выработке кислорода из воздуха/. Причина также в том, что продолжительность горения печи на одной закладке дров мала. Печь порой не успевает разогреться, так тут же ей приходится тухнуть из-за выработки всего топлива. И до стационарного режима горения дело не доходит.

5.8.3. Обугливание поленьев в микротопках

В любом газогенераторе самопроизвольно формируются зона “предпламенной” подготовки /нагрева-просушки/ дров, зона обугливания /пламенного выделения газообразных горючих/ поленьев, зона образования и горения наиболее ценного горючего компонента - древесного угля.

Можно ожидать, что подобная картина нагрева и обугливания характерна и для каждого горящего полена в отдельности. По мере прогрева внутрь, древесина сначала сохнет, а затем претерпевает постадийный пиролиз - обугливается с выделением летучих /рис.274/. Причем глубокий пиролиз происходит не просто в отсутствии кислорода воздуха /то есть не просто в инертной среде/, а именно в среде самих продуктов пиролиза, что в значительной степени формирует специфику химического состава газообразных продуктов термодеструкции [125, 126].

Для первичного численного анализа предположим чисто условно /гипотетически, абстрактно/, что вся поверхность древесины в какой-то момент времени мгновенно принудительно нагревается и далее постоянно искусственно поддерживается при строго неизменной во времени температуре, например, 500°C. В этом простейшем модельном случае расчеты по теории теплопроводности [127, 128] дают динамику разогрева в виде “волны нагрева” - профилей температуры, постепенно распространяющихся вглубь древесины /рис.275-а/.

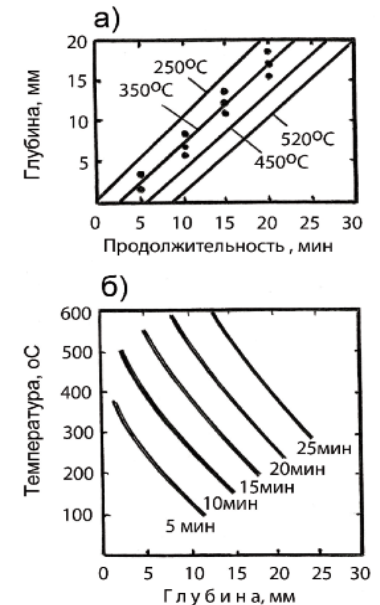


Рис.276. Экспериментальные данные по динамике распространения тепла в глубину древесины сосны поперек волокон при тепловом потоке 33 кВт/м² [125]. Черными точками указаны глубины расположения обугленного слоя, измеренные протыканием углей иглой.

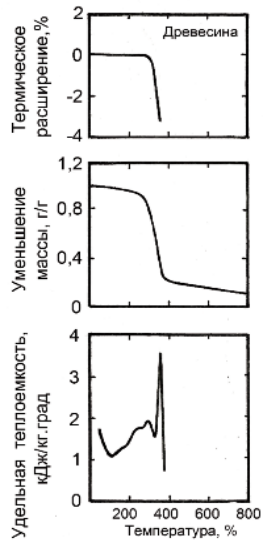


Рис.277. Свойства сосновой древесины при нагреве [133].

По мере распространения тепловой волны ее линейная скорость снижается. Так же снижается и тепловой поток вглубь древесины /из-за постепенного уменьшения градиента температуры в древесине/. Так, через первую минуту после начала нагрева скорость тепловой волны составляет 2,5 мм/мин при тепловом потоке 15 кВт/м², через 4 минуты 1,2 мм/мин при 6 кВт/м², через 15 минут 0,6 мм/мин при 3,5 кВт/м², через 60 минут 0,34 мм/мин при 1,7 кВт/м², через 120 минут 0,25 мм/мин при 1,1 кВт/м² /рис.275-а/.

Для первичного оценочного анализа можно рассмотреть также случай нагрева поверхности древесины постоянным тепловым потоком /например, лучистым/. При этом тоже возникает

тепловая волна, но уже с постепенным повышением температуры поверхности /рис.275-б/. Скорость распространения тепловой волны в этом случае оказывается существенно меньшей, чем в случае поддержания постоянно высокой температуры поверхности древесины /2,5 - 0,25 мм/мин на рис.275-а, 0,36 - 0,12 мм/мин на рис.275-б/.

Вышеприведенные оценочные расчеты не учитывали термодеструкцию древесины /рис.277/. Но ведь уже при 220°C начинает разлагаться гемицеллюлоза, при 280°C целлюлоза, а при 320°C лигнин древесины [5, 123, 129-133]. Поэтому, профиль температуры в древесине имеет более сложный характер /пунктирная кривая на рис.275-а/. Кроме того при 350°C древесина обугливается и пропускает меньше тепла из-за пониженной теплопроводности слоя древесного угля. Но, тем не менее, сам по себе древесный уголь прогревается быстрее древесины из-за высокого коэффициента температуропроводности $a = \lambda / \rho C_p$:

Материал	ρ кг/м ³	C_p кДж/кг.град	λ Вт/м.град	$a \cdot 10^7$ м ² /сек
Сосна поперек волокон (относительная влажность 25%)	500	2,3	0,18	0,75
Древесный уголь	300	1,0	0,04	1,3
Вода	1000	4,2	0,59	1,4
Воздух	1,3	1,01	0,024	185

Напомним, что теплоемкость абсолютно сухой древесины составляет 1,68 кДж/ кг.град.

Несмотря на абстрактность принятой модели, динамика нагрева, рассчитанная по столь упрощенной методике, близка к реальности. Так, при тепловом потоке 33 кВт/м² экспериментально измеренная скорость распространения тепловой волны вглубь древесины составила примерно 1 мм/мин при глубинах прогрева до 20 мм /рис.276/.

Вообще говоря, в пожарном деле считается, что скорость обугливания древесины равна $V(\text{мм/мин}) = 0,022W(\text{кВт/м}^2)$, где W - тепловой поток на поверхность древесины [125]. А фронт обугливания совпадает с фронтом прогрева древесины до 350°C /см. черные точки на рис.276-а/. Поскольку при пожарах достигаются тепловые потоки 10 - 200 кВт/м², то скорости обугливания древесины составляют 0,2 - 4 мм/мин. Видимо, такие же скорости обугливания характерны и для дров в печи.

5.8.4. Тепловая нагрузка на древесину

Таким образом, для поддержания процесса последовательного послойного обугливания древесины /то есть для непрерывного образования горючих компонентов - углей и летучих/ в микротопках необходим непрерывный поток тепла вглубь древесины.

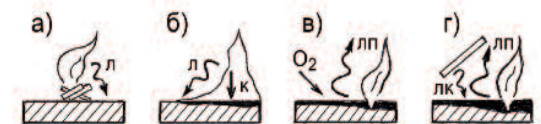
Откуда же берется в микротопках этот тепловой поток, который греет древесину и вызывает ее обугливание? Ведь сначала в закладке холодных дров никаких тепловых потоков нет.

Первичный тепловой поток возникает при розжиге первой микротопки с помощью тепла от горения "растопки". А затем тепловые потоки в микротопке поддерживаются "сами собой" автоматически за счет собственного горения древесных стенок микротопки.

Растопка - это начальная закладка "мелких" дров /спичка-бумага-лучина/. Как уже отмечалось /раздел 1.2.4/, такая растопка "самодостаточна" в том смысле, что может гореть самостоятельно, поскольку "мелкие" дрова /в том числе и в виде "растопки"/ могут гореть даже в одиночку без внешнего нагрева. А вот крупные дрова требуют подвода тепла извне.

Пламя от самостоятельно горящей растопки начинает греть расположенные рядом холодные крупные поленья своим лучистым теплом /рис.278-а/, а при расположении поленьев над растопкой, то и конвек-

Рис.278. Тепловые потоки на древесину: л - лучистый от пламени, к - кондуктивный от пламени, лп - лучистые потери, лк - компенсация лучистых потерь.



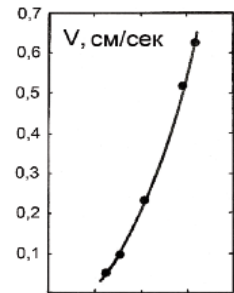
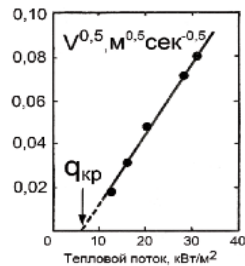


Рис.279. Скорость распространения горения по горизонтальной поверхности сосновой древесины в зависимости от величины внешнего теплового потока на древесину [137].

тивным теплом от пламени. Тем самым растапливается первая микротопка, а затем она сама уже поджигает своими пламенами и своим тепловым излучением соседние микротопки.



Детальный процесс воспламенения поверхности древесины огнем от растопки весьма сложен /рис.278-а/. Возникающее вследствие внешнего нагрева (л) собственное пламя на поверхности поленьев само начинает греть древесину поленьев лучистым (л) и конвективным (к) потоками тепла /рис.278-б/. Этого тепла хватает для распространения огня по поверхности мелких поленьев, но не хватает для распространения пламени по поверхности крупных поленьев, поскольку основное тепло от пламени бесполезно уходит вверх, а обугливание поверхности крупного полена требует большого количества

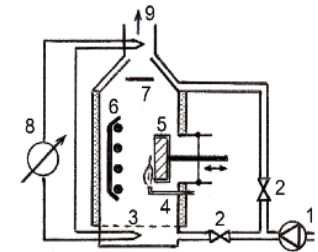
тепла для подсушки, разогрева и газификации больших объемов глубинной древесины.

Поскольку пламя является горящим потоком летучих с поверхности древесины, то этот поток отталкивает окружающий воздух и не позволяет кислороду проникать к раскаленному, но не горящему обугленному слою. Но если пламя "сдуть" или пламя локализовать в местах трещин /рис.278-в/, то это откроет дорогу кислороду к поверхности обугленного слоя. И обугленный слой начинает тлеть. Причем тепловыделение от горения углей приводит к повышению температуры поверхности, а это в свою очередь приводит к росту тепловых потоков как вглубь древесины, так и наружу в окружающую среду. Для перевода тления в пламенное горение необходим внешний тепловой поток (лк), компенсирующий хотя бы часть лучистых потерь (лп) с поверхности обугленного слоя /рис.278-г/.

Все эти обстоятельства привели к тому, что в теории горения древесины ввели понятия "термически тонкого" и "термически толстого" образцов древесины /см. раздел 1.2.4/. Если глубина прогрева во время огневого процесса меньше толщины образца, то это термически толстый горючий материал. И наоборот, если нагрев сразу охватывает всю толщину образца, то это термически тонкий горючий материал [138].

Термически толстые поленья могут самостоятельно тлеть, но гореть пламенем могут только в костре или в горячей топке, где поверхность полена греется лучистым теплом от соседнего горячего полена или от раскаленной стенки топливника. Промежутки между горящими и греющимися друг друга поленьями мы назвали "микротопками". То есть понятие микротопки включает в себя требование наличия внешнего потока тепла на древесину.

Рис.280. Принципиальная схема calorimetra для исследования горения древесины по стандарту ASTM E906: 1 - воздуходувка, 2 - расходомеры, 3 - сетчатый распределитель воздуха, 4 - газовая горелка поджигает летучих, 5 - плоский образец древесины 150x150x10 мм в держателе, 6 - панель лучистого нагрева, 7 - турбулизатор, 8 - термопара для измерения температуры отходящих газов, 9 - отходящие газы [136, 142].



Если построить зависимость корня квадратного из скорости распространения пламени по поверхности крупного полена от величины внешнего лучистого теплового потока, то обнаружится некое минимальное /критическое/ значение величины внешнего теплового потока $q_{кр}$, ниже которого распространение пламени по поверхности невозможно /рис.279/. Для сосны эта величина составляет порядка 5-7 кВт/м². При этом молчаливо подразумевается, что имеется еще и "собственный" тепловой поток на древесину от пламени. При тепловых же потоках порядка 14 кВт/м² возможно уже не просто распространение огня по древесине, а воспламенение летучих над негорящей древесиной от внешнего источника поджиг /см. раздел 1.2.1/. При тепловых же потоках порядка 20 кВт/м² возможно уже самовоспламенение древесины.

Все более и более глубокое обугливание древесины по мере прогорания поленьев приводит к неминуемому снижению теплового потока вглубь древесины. При этом постепенно снижается выход летучих из древесины, препятствующий поступлению кислорода к поверхности горящей древесины. Значит, кислород начинает все легче и легче проникать к раскаленному обугленно-

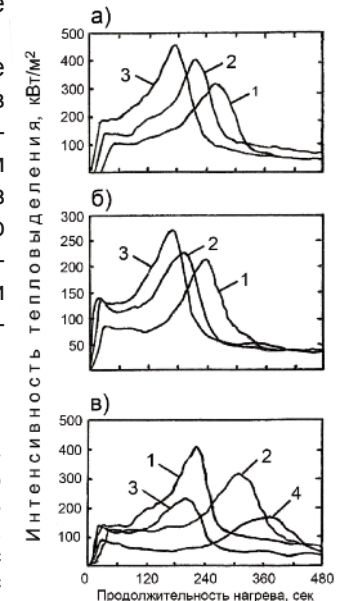


Рис.281. Динамика тепловыделения в ходе горения образцов древесины при различных плотностях внешнего теплового потока [138]: а - береза с влажностью 5,5% (1 - 20 кВт/м², 2 - 35 кВт/м², 3 - 52 кВт/м²), б - ель с влажностью 6,4% (1 - 20 кВт/м², 2 - 35 кВт/м², 3 - 52 кВт/м²), в - береза и ель при 35 кВт/м² (1 - береза с влажностью 7%, 2 - ель с влажностью 7%, 3 - береза с влажностью 14%, 4 - ель с влажностью 14%).

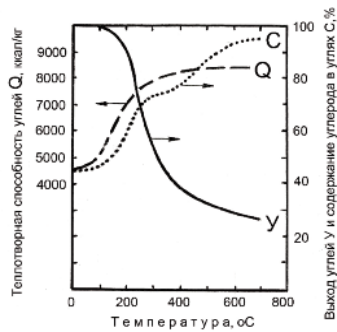


Рис.282. Массовый выход углей из древесины Y, содержание общего углерода в образующихся углях C и теплотворная способность углей Q в зависимости от температуры получения углей [139].

му слою. Это приводит к повышению тепловыделения и к повышению температуры обугленной поверхности /условно с 270°C до 1000°C/, к повышению тепловых потоков вглубь древесины и наружу.

В результате, огневой процесс на поверхности древесины удается условно

разделить на два предельных случая - на начальный этап преимущественного горения летучих в форме пламени над поверхностью обугленной древесины /объемный газофазный этап/ и завершающий этап преимущественного горения древесного угля на поверхности обугленной поверхности /поверхностный гетерогенный этап/.

Особенности этих двух этапов могут быть выявлены по экспериментальной методике ASTM E906 [142]. Образец древесины нагревают фиксированным лучистым потоком и измеряют при этом калориметром интенсивность /мощность/ выделяющегося при горении тепла /рис. 280/. Временная зависимость интенсивности тепловыделения имеет двухгорбый характер, то есть процесс горения действительно имеет две стадии /рис.281/. Причем стадия горения углей имеет более высокое тепловыделение [134-138].

При увеличении плотности внешнего теплового потока максимальные значения интенсивности /мощности, скорости/ тепловыделения возрастают, а времена достижения максимума интенсивности тепловыделения снижаются /рис.281/. То есть, чем больше величина внешнего теплового потока, тем быстрее обугливается и интенсивней горит древесина [125]. Это объясняется тем, что чем больше тепла идет на пиролиз древесины, тем больше образуется горючих /см. раздел 5.7/. И внешний тепловой поток со стенок микропор на древесину играет при этом роль "краника на газовой трубе".

5.8.5. Свойства обугленного слоя

При общей теплоте сгорания древесины березы в целом 19500 кДж/кг теплота сгорания летучих составляет 16600 кДж/кг, а теплота сгорания углей 34300 кДж/кг = 8160 ккал/кг [140]. Однако, следует иметь в виду, что

теплотворная способность древесных углей сильно зависит от температуры их получения /рис.282/, а поэтому и от способа получения /см. стр.236/. То есть древесные угли, образующиеся в глубине обугленного слоя горящей древесины, имеют значительно более низкую теплотворную способность, чем древесный уголь на поверхности горящей древесины /из-за "недожога" - наличия летучих, удаляемых лишь при прокалке углей при высоких температурах/. Наличие "невыжженных" летучих влияет и на температуру самовозгорания древесных углей /рис.283/.

Обычно принимается, что товарный древесный уголь имеет пикнометрическую плотность /истинную плотность самого вещества/ порядка 1500 кг/м³. Плотность пористых кусков углей из березы составляет 380 кг/м³, из сосны 300 кг/м³, из ели 260 кг/м³. Насыпной вес /складская мера/ кусков углей из березы составляет 160 кг/м³, из сосны 130 кг/м³, из ели 110 кг/м³. Удельная теплоемкость древесных углей составляет 0,71 кДж/кг.град при 24°C, 1,05 кДж/кг.град при 425°C, 1,5 кДж/кг.град при 925°C [140]. Удельная теплоемкость химически чистого углерода при комнатной температуре составляет 0,672 кДж/кг.град [141].

Товарный древесный уголь сохраняет форму и текстуру исходных древесных чурок, но обладает меньшими линейными размерами из-за усадки при термодеструкции древесины /рис.284/. Прокалку /углежжение/ древесины для получения товарного древесного угля ведут с медленным подъемом температуры так, чтобы не было больших перепадов температуры внутри древесины. Вследствие этого, древесина обугливается одновременно на всех глубинах, и товарный древесный уголь, не смотря на значительную усадку, не имеет крупных трещин.

А вот угли на поверхности обугливающейся при горении древесины образуются при быстром прогреве древесины под действием внешнего лучистого потока и сильно растрескиваются. Это объясняется тем, что угольный слой при этом формируется на нетронутой огнем древесине как на основе-матрице, не изменяющей своих линейных размеров. Поэтому угольный слой попросту рвется, не в силах ни сжать древесину, ни сдвинуться /сжаться, отковырнуться/ послойно относительно матрицы древесины.

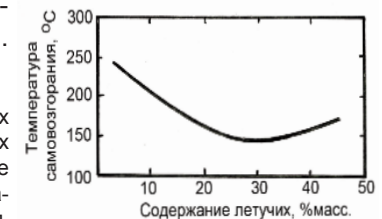


Рис.283. Температура самовозгорания древесных углей в зависимости от массового содержания в них летучих, выделяемых при дополнительной прокалке углей до 900°C, то есть от содержания в них остаточных количеств водорода, кислорода и азота [139].

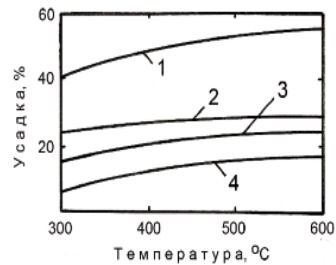


Рис.284. Усадка древесины при прокаливании в инертной среде в ходе производства древесных углей [139] : 1 - объемная, 2 - линейная тангенциальная /азимутальная/, 3 - линейная радиальная /поперек волокон/, 4 - линейная аксиальная /вдоль волокон/.

Образующиеся трещины угольного слоя имеют большую глубину /рис.266-а, 267/, и именно через них преимущественно выходят потоки паров воды и летучих /рис.285/.

5.8.6. Влияние влажности древесины.

Часто говорят, что высокая влажность дров не позволяет получить высокие температуры топливника, поскольку вода при испарении отбирает тепло от топливника. Но ведь вода может отбирать тепло только там /в той точке/, где она испаряется. А испаряется она в глубине поленьев, то есть испарение охлаждает не топливник, а именно дрова.

Эта вода, испаряющаяся из дров, выявляется визуально при растопке холодной печи по каплям росы на стеклянной дверке топливника, по увлажнению стенок топки и футеровки, по конденсату, стекающему по дымовой трубе. При последующем прогреве печи этот конденсат, сыгравший некую /незначительную/ роль в первичном нагреве внутренностей печи, начинает испаряться со стенок, в том числе с образованием тумана - белой дымки /"клубов пара"/, теперь уже несколько охлаждая внутренности печи.

На нагрев абсолютно сухих дров до температуры обугливания 350°C уходит 588 кДж/кг тепла. При относительной влажности дров 10%, 20% и 30% эта величина повышается соответственно до 905 кДж/кг, 1222 кДж/кг и 1539 кДж/кг. То есть, для нагрева дров с типичной относительной влажностью 20-30% уходит в 2-3 раза больше тепла, чем на нагрев абсолютно сухой древесины. Причем, на разогрев дров уходит до 10% всей теплотворной способности дров. Это значит, что для быстрой растопки надо использовать как можно более сухие дрова и как можно больше тепла растопки пускать на разогрев дров. Именно поэтому печь при верхнем розжиге закладки

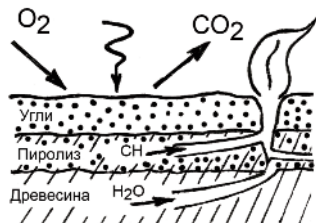
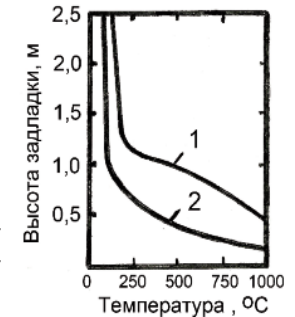


Рис.285. Выделение летучих из горячей древесины через трещины обугленного слоя.

Рис.285. Выделение летучих из горячей древесины через трещины обугленного слоя.

Рис.286. Распределение температуры по высоте газогенератора на древесной щепе: 1 - щепы с исходной относительной влажностью 35%, 2 - щепы с исходной относительной влажностью 60% [123].



дров разгорается существенно медленней, чем при нижнем розжиге /см. раздел 5.3.2/.

Действительно, при горении влажной древесины первый этап огневого процесса, связанный с горением летучих, оказывается более затянутым по времени, а уровни интенсивности тепловыделения оказываются более низкими, чем в случае сухой древесины /рис.281-в/.

Таким образом, волна тепла, распространяющаяся вглубь горящей древесины, идет в первую очередь на испарение влаги в глубине древесины. То есть, профиль температуры в глубине влажной древесины имеет более крутой вид, чем в сухой. В результате, толщина прогретого слоя во влажной древесине меньше, чем в сухой. Интересно отметить, что более крутой профиль температуры образуется и в газогенераторах, работающих на влажной древесине /рис.286/.

Влажная древесина требует для своего горения более высоких внешних тепловых нагрузок. А это может быть осуществлено только при более высоких температурах стенок микротопок между поленьями. А стенки микротопок нагреваются преимущественно поверхностным окислением /горением/ угольного слоя. Так что влажная древесина требует подачи большего количества воздуха. Режимы с ограниченной подачей воздуха в топливник /точнее, с малой линейной скоростью на влажные дрова/ термически неустойчивы.

Но вода и вне древесины /уже в виде водяных паров/ оказывает существенное влияние на процессы горения древесины. Дело в том, что при высоких температурах протекает реакция газификации раскаленного углерода парами воды с образованием синтез-газа ($\text{CO} + \text{H}_2$) с потреблением большого количества тепла по химической реакции $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2 - 28300$ ккал/кг-моль. В результате, весь раскаленный свободный углерод /и в виде частиц сажи в пламенах, и в виде углей обугленного слоя/ превращается в горючие газы. То есть все пламена и все обугленные поверхности тут же остывают, что вызывает замедление процессов горения. Но зато образуются горючие газы с высокой теплотворной способностью, которые могут сгорать, в том числе гомогенными пламенами, практически не видимыми глазом.



Рис.287. Модель неустойчивости пламени в закладке горящих дров - поток воздуха по траектории 1 вызывает повышенное выделение летучих в зазоре, в результате чего поток воздуха "отталкивается" и устремляется по траектории 2.

В печной практике это проявляется в том, что протопка печи влажными дровами сопровождается хорошим прогревом каналов конвективной системы, но после окончания пламенного горения в топливнике не остаются горящие угли. А при протопке очень сухими дровами /также как и каменным углем/ каналы конвективной системы прогреваются слабо, но зато стенки топливника сильно перегреваются /с возможным растрескиванием кладки/, а после окончания пламенного горения в топливнике остается много горящих углей. Поэтому сухие дрова лучше подходят для металлических печей, в которых теплоъем осуществляется преимущественно через стенки топливника /"прямой теплоотдачей" по котельной терминологии/.

В быту иногда безосновательно полагают, что влажные дрова хорошо прогревают каналы за счет повышенной теплопроводности влажных дымовых газов и за счет конденсации паров воды. Однако, водяной пар имеет не столь уж высокую теплопроводность /см. рис.80/, а конденсация паров воды в дымоходах вообще не допустима.

5.8.7. Пульсации горения дров

Динамика горения поленьев в микротопках обладает некоторыми специфическими особенностями. В частности, это касается вопросов устойчивости коллективного пламенного горения в закладке дров.

Представим себе, что воздух начинает преимущественно поступать по траектории 1 в один из зазоров /в микротопку/ между двумя поленьями /рис.287/. Ввиду интенсификации горения в зазоре резко повышается выход летучих из раскаленной обугленной древесины. Зазор между поленьями 1 уже не в состоянии пропустить повышенное количество газов, что выражается в повышении газодинамического сопротивления зазора. Поэтому воздух устремляется в

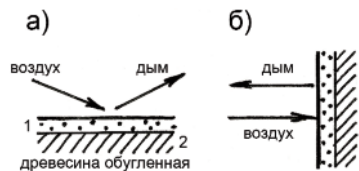


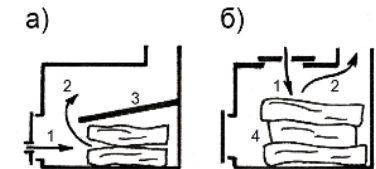
Рис.288. Направленности потоков воздуха и дымовых газов: а - спутные, б - встречные.

другой зазор между горящими дровами /по иной траектории 2/, который тоже начинает разгораться и тоже "запирается". В результате возникают нескончаемые пульсации горения дров - рвущиеся вверх пламена попеременно перескакивают из одного зазора в другой. Спокойное равномерное горение возможно лишь при наличии не воспламенившихся зазоров, то есть когда закладка дров только начинает разгораться.

Неустойчивости газовых течений в закладках горящих дров становятся особенно заметными при встречных движениях воздуха и дымовых газов. Дело в том, что встречные потоки дымовых газов могут перегораживать доступ свежему воздуху к очагу горения /рис.288-б/, в отличие от потоков дымовых газов, спутных воздуху /рис.288-а/. Если доступ воздуха прекращается, то и горение у поверхности полена приостанавливается. Но в последующие моменты времени поверхность горящего полена остывает, выход летучих снижается, и кислород вновь начинает поступать к поверхности полена. При этом могут образовываться неустойчивости горения [53], аналогичные неблагоприятным пульсационным режимам, наблюдаемым в камерах сгорания жидкостных турбореактивных двигателей и даже полезно используемым в газовых котлах с пульсирующим горением типа ПВ-100 производства ФГУП "Крэмз".

Эффект становится особенно нежелательным фактором при хорошо разгоревшихся дровах при одновременной острой подаче /струей/ воздуха в тупиковые микротопки закладки дров, то есть при раскаленных "пещерах" в закладке дров, способных при разгорании мгновенно "запирать" вход воздуха. В этом случае пульсации горения сопровождаются хлопками в топливнике и порой даже приобретают вид непрерывных "пулеметных" залповых выбросов пламени и дыма через воздухоподающие отверстия. Металлическая печь может зареветь и затрястись - "пойти в разгон" [6, 143]. Неплотно прижатая дверца топливника может начать постукивать /бренчать/. Выбросы пламени исчезают при открытии дверки топливника, при механическом разбиении /турбулизации/ остро направленной струи воздуха, при уменьшении разрежения в топливнике, при удачном изменении порядка укладки горящих поленьев.

Рис.289. Частные случаи появления неустойчивостей горения: а - герметичная подовая печь с острой боковой подачей струи воздуха в зазоры между поленьями, б - подача воздуха сверху через щель в камфорке варочной плиты. 1 - струя воздуха, 2 - поток летучих, 3 - горизонтальный дымооборот, 4 - закладка горящих дров.



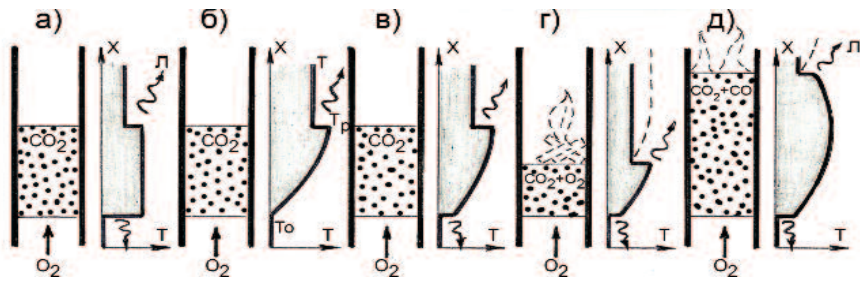


Рис.290. Высотные /по оси X / распределения температуры $T(X)$ в горячем на решетке угольном слое разной толщины : а - модель мгновенной выработки кислорода на нижней поверхности слоя /непосредственно у решетки/, б - модель постепенного выработки кислорода, в - промежуточная модель постепенной выработки кислорода, г - модель постепенной выработки кислорода в тонком слое /печном/, д - модель постепенной выработки кислорода в толстом слое /газогенераторном/. На рис.290-б обозначения приняты в соответствии с расчетными формулами на стр.74: T_0 - исходная температура воздуха, T - термодинамическая температура горения, T - температура дымовых газов на выходе с верхней поверхности слоя. л - лучистые потоки с поверхностей горящего угольного слоя.

Явно выраженные пульсационные выбросы пламени наблюдаются преимущественно в герметичных подовых топливниках с одним воздухоподающим отверстием /рис.289/. Для предотвращения выбросов пламени в воздухоподающем отверстии монтируется рассекатель воздушной струи /например, угольковый в случае печей типа "Булерьян"/.

В обычных кирпичных бытовых отопительных печах с колосниковыми топливниками, а тем более в дровяных кухонных плитах с чугунной варочной плитой, пульсационные выбросы наблюдаются редко, ввиду отсутствия герметичности топливника и поступления /подтекания/ воздуха через многочисленные отверстия-неплотности в корпусе.

5.8.8. Горение углей на решетке

Пульсации горения наблюдаются только при раскаленных, но неполностью обугленных дровах, когда из древесины выделяется много летучих в виде развитых пламен. На колосниковой же решетке располагаются, как правило, сильно обугленные дрова /в виде раскаленных древесных углей/, и пульсации горения на решетке не возникают.

Холодный воздух проходит через горячую решетку и нагревается. Сам по себе этот нагрев воздуха не является, видимо, решающим фактором для процесса горения дров. Но тем не менее, как подчеркивается во многих книгах по котельным топкам, явление нагрева воздуха на

решетке является практически значимым обстоятельством в плане надежности конструкции топочного узла, поскольку поток воздуха в ходе своего нагрева заметно охлаждает саму решетку и предотвращает ее термическое разрушение и деформацию /прогар, коробление/. Во всяком случае достоверно известно, что в топках дровяных котлов температура решетки снижается при увеличении расхода воздуха [117].

В то же время все знают, что если обдуть воздухом горящие угли костра /например, в мангале при жарке шашлыка/, то они разгорятся еще сильнее. Более того, обдувом воздухом /как охлаждающим потоком/ вообще не удастся погасить горение древесных углей. Это означает, что горящим углям "не хватает воздуха" в том смысле, что они "охотно" бы потребили значительно больше воздуха /как окислителя/, чем его реально поступает на поверхность горящих углей.

В таком случае, более сильный вдув воздуха снизу в горящий угольный слой должен приводить к повышению температуры обдуваемой нижней поверхности углей, а заодно и к нагреву решетки, на которой этот угольный слой собственно и располагается. То есть высотное распределение температуры в слое углей можно было бы ожидать в виде некой "ступеньки" /рис.290-а/. Воздух, раздувая нижнюю поверхность горящего угольного слоя, тут же вырабатывается /поскольку угли "могут взять весь кислород"/. В верхних слоях угольного слоя кислорода уже нет, температура поэтому сохраняется постоянной. Температура угольного слоя /как единого целого/ определяется из энергетического баланса слоя - тепло, выделившееся в процессе химического поглощения кислорода, идет на нагрев дымовых газов и на лучистые потоки "л" /показанные волнистыми стрелками/ с нижней и верхней поверхностями слоя.

Но в действительности кислород не успевает выработаться на нижней поверхности угольного слоя и проникает снизу вглубь угольного слоя /рис.263/. Это обуславливает не однократный мгновенный, а постепенный разогрев угольного слоя, причем из-за наличия золы /шлаков/ разогрев решетки может вообще не происходить. Решетка в таком случае имеет низкую температуру /рис.290-б/. Собственно такая модель и была использована для оценочного расчета температуры угольного слоя в разделе 1.4.

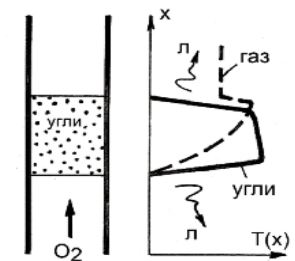


Рис.291. Явление неравновесности в горящем угольном слое: температура газа /смеси воздуха с дымовыми газами/ отличается от температуры углей.

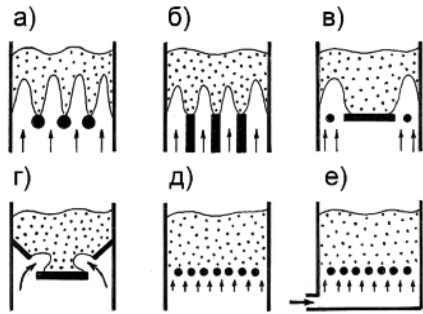


Рис.292. Каверны в слое угля, горящего на решетках разных модельных форм.

Чтобы согласовать эти две крайние по своей физической сущности модели горения слоя углей /рис.290-а и рис.290-б/, можно было бы ввести некую промежуточную модель с первичным скачком температуры на фронтальной /нижней/

стороне угольного слоя с последующим плавным ростом температуры в глубине угольного слоя /рис.290-в/. Это помогло бы как-то согласовать применяемую абстрактную теоретическую модель с реально наблюдаемой картиной явления нагрева решеток как в печах с тонким слоем углей /рис.290-г/, так и в газогенераторах с толстым слоем углей /рис.290-д/. Однако, тем не менее, никакими подобными искусственными ухищрениями невозможно получить полезные выводы, а тем более, углубиться в физическую суть процесса.

Дело в том, что все эти гипотетические модели на рисунке 290 никак не учитывают, что горящие угли могут иметь более высокую температуру, чем воздух, в котором эти угли собственно и горят. Ведь процесс горения развивается в угольном слое конечной толщины - не более 1-2 слоев кусков древесного угля /рис.263/. При этом фильтрующийся поток воздуха просто не успевает прогреться /в приосевых зонах каналов/ до температуры горящих углей. Вообще говоря, аналогичная картина наблюдается и в случае проникновения исходно холодного воздуха в горячую микротопку между пламенно горящими поленьями /рис.268/.

Процесс горения в тонком угольном слое не просто нестационарный /изменяющийся в пространстве/, но и неравновесный термодинамически, когда температура углей одна, а температура воздуха совсем иная. Фактически речь идет о том, что в каналах между кусками углей имеется воздух с разным содержанием кислорода и с разной температурой.

Действительно, уголь может жарко гореть даже в холодном воздухе - так о какой единой температуре может идти речь? Тем более, что скорость химической реакции горения определяется температурой горячей поверхности кусков /частиц/ углей, а не температурой воздуха или температурой в глубине кусков углей. Термодинамическая равновесность может быть достигнута лишь при долгом соприкосновении раскаленного угля и воздуха, когда воздух успеет прогреться от углей. И

если учесть, что на сгорание 1 кг углей уходит 11 кг воздуха, то становится ясным, что нагрев столь значительного количества воздуха /и дымовых газов/ может быть очень продолжительным. Так что фактически на фронтальной /нижней/ поверхности углей /то есть на решетке/ мы имеем раскаленные угли, но холодный воздух /рис.291/.

Кроме того, выгорание углей на решетке вызывает появление каверн в слое /рис.292/. При отсутствии шуровки холодный воздух в этом случае еще глубже проникает в угольный слой.

При гетерогенном горении нет заранее приготовленной /перемешанной/ гомогенной смеси горючего и окислителя /см. раздел 1.3.2/. Угли и кислород разделены, и химическая реакция горения /окисления/ идет на поверхности кусков /частиц/ углей. Скорость горения $K = kC$ пропорциональна константе скорости химической реакции $k(T) = A \exp(-E/T)$ и концентрации кислорода у поверхности углей C . С другой стороны скорость поверхностного горения $K = a(C_0 - C)$ определяется скоростью поступления кислорода и пропорциональна коэффициенту диффузионного обмена a и разности концентраций кислорода в удалении от углей и на поверхности углей $(C_0 - C)$. Комбинируя эти соотношения, получаем формулу для скорости гетерогенного горения $K = K_0 C_0$, где $K_0 = (k^{-1} + a^{-1})^{-1}$.

Отсюда следует, что при высоких температурах $a \ll k$ скорость горения определяется скоростью диффузии кислорода к поверхности углей, поскольку раскаленные угли на своей поверхности способны поглотить "любое" сколь угодно большое количество кислорода /диффузионный режим горения/. При низких же температурах $k \ll a$ скорость горения определяется скоростью окисления на поверхности углей, поскольку диффузия поставляет так много кислорода, что угли не успевают прореагировать с ним /кинетический режим горения, а фактически просто окисления/. Действительно, при низких температурах скорость горения угля зависит только от температуры углей, но не зависит от скорости набегающего воздуха /рис.293/. А при высоких температурах скорость горения не зависит от температуры углей, но зависит от скорости набегающего воздуха /приведены данные для электродного угля, для древесных же углей линейная скорость выгорания будет в несколько раз большей из-за высокой пористости углей/. Температура горения не зависит от температуры воздуха, а равна температуре поверхности углей и в отличие от случая гомогенного горения определяется не термодинамикой, а тепловым балансом поверхности углей.

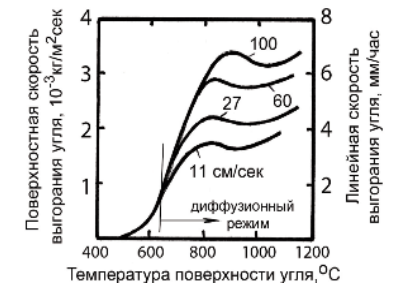


Рис.293. Температурная зависимость скорости горения сферических частиц электродного угля в потоке воздуха при различных линейных скоростях набегающего потока воздуха [144].

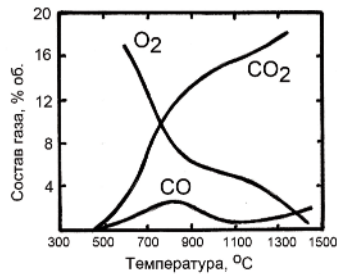


Рис.294. Состав дымового газа в конце канала из электродного угля в зависимости от температуры стенок канала [144]. Расход воздуха 10 л/мин /усредненная линейная скорость воздуха в канале 150 см/сек/, диаметр канала 12 мм, длина канала 950 мм.

Именно высокотемпературное горение углей реализуется на решетке, и именно раскаленные угли горят в диффузионном режиме [144,145], то есть при низкой концентрации кислорода на поверхности. Это означает, что около горящего куска /частицы/ углей имеется резко неоднородное поле температур и концентрации окислителя. И если вдоль угольного канала наблюдается снижение концентрации кислорода, то значит, что и температура газов /смеси воздуха и дымовых газов/ неуклонно повышается /рис.294/.

Ясно, что лучистое тепло с раскаленной поверхности горящих углей охлаждает слой углей, но греет решетку. А поступающий холодный воздух охлаждает решетку. Причем, чем сильнее поток воздуха, тем лучше охлаждается решетка. Также ясно, что высокая решетка /рис.292-б/ лучше охлаждается, чем низкая /рис.292-а/. Наиболее высокая температура решетки достигается в местах, промежуточных между явно застойными зонами и явно продуваемыми. Чем больше газодинамическое сопротивление решетки, тем равномерней распределяется воздух по площади однородной решетки /исчезают места преимущественного течения воздуха/. Чем больше сопротивление решетки, тем больше нужно разрежение в топливнике. А механическое дутье /напор в поддувале/ снижает потребность в сильном разрежении в топливнике. Так что желательно иметь решетку с большим сопротивлением, но с сильным нагнетанием воздуха в поддувало.

Большой практический интерес вызывает выбор оптимальной величины площади проходного /"живого"/ сечения решетки. По сути речь идет о выборе величины линейной скорости воздуха в решетке при заданном массовом расходе воздуха. При стандартизированном проектировании по ГОСТ 2127-47 оптимальная площадь решетки принимается равной 40 см², а проходное сечение решетки 10 см² в расчете на скорость горения 1 кг дров в час, что соответствует /в пересчете/ линейной скорости воздуха в отверстиях /проемах, щелях/ решетки 1-3 м/сек при коэффициентах избытка воздуха в пределах 1-3.

В соответствии с давно устоявшимися среди печников соображениями [44], для сжигания углей используется малый расход воздуха, но с

большой линейной скоростью - "струей" /то есть требуется открыть задвижку на трубе и прикрыть поддувало/. А для сжигания дров используется большой расход воздуха, но с малой линейной скоростью /то есть требуется прикрыть задвижку на трубе и раскрыть поддувало/.

5.8.9. Пепел на углях

Горение углей /в том числе и на обугленной древесине/ сопровождается образованием пепла в виде слоя белесой "паутинки" на поверхности углей /рис.295/. Образование пепла - это выделение /в виде остатка от древесины/ негорючих минеральных веществ - твердых окислов.

Воздушно-сухая древесина содержит в % масс.[129]:

	Вся зола	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	SiO ₂
Бук	0,55	0,09	0,02	0,06	0,31	0,03	0,03
Береза	0,26	0,03	0,02	0,02	0,15	0,02	0,01
Лиственница	0,27	0,04	0,02	0,07	0,07	0,03	0,01
Дуб	0,51	0,05	0,02	0,02	0,37	0,03	0,01
Сосна	0,26	0,04	0,01	0,03	0,14	0,02	0,04

Пепел не препятствует диффузии кислорода к горячей поверхности углей, но затрудняет доступ к поверхности воздушных потоков. Поэтому, наличие пепла, вообще говоря, снижает скорость горения углей.

В то же время, энергичные потоки воздуха, обладающие высокими линейными скоростями, могут механически сдвигать с поверхности слой пепла, что открывает поверхность горящих углей потоку свежего воздуха. Пепел может удаляться также стряхиванием или соскабливанием с поверхности при самопроизвольных обрушениях дров и при шуровках.

Горение нижней поверхности слоя углей, расположенной непосредственно на воздухопродуваемой решетке, сопровождается проседанием всего угольного слоя вниз и накоплением пепла на решетке. Этот слой пепла между горящим углем и решеткой снижает темпе-



Рис.295. Пепел /изображенный "звездочками"/ образуется при горении древесных углей, накапливается на поверхности углей или на поверхности обугленной древесины 1, проваливается 2 через решетку в поддувало /или на глухой под/, накапливается 4 на решетке /или на глухом поде/ или уносится потоком дымовых газов 5.

ратуру решетки и предохраняет ее от прогара. Горение же кусков углей в объеме /в глубине/ слоя сопровождается уменьшением размеров кусков. Внутри слоя между кусками образуются пустоты, каналы, своды, что ведет к обвалам кусков. Куски горящих углей, проскальзывая друг относительно друга, обшелушивают /сдирают/ с себя слой пепла. При этом пепел может утрамбовываться, спекаться, перекристаллизовываться в малопрочные гранулы /крупинки/, называемые золой /реальным остатком-осадком от сгоревшей древесины/.

Часть пепла выносится из топливника потоками дымовых газов в форме так называемой “летучей золы” /зоны уноса/. Другая часть пепла проваливается на глухой под или на решетку и далее в зольник в форме так называемой “подовой золы” /осадочной золы или зольного остатка/.

Летучая зола в свою очередь подразделяется на крупную и мелкую фракции [146].

Крупная фракция представляет собой фрагменты слоя пепла, механически оторванные /сдутые/ газовым потоком с поверхности углей. Крупная фракция состоит из “пушистых” образований /конгломератов/ размером до нескольких миллиметров из частиц окислов размером нескольких микрометров. Мелкая же фракция образуется в объеме над поверхностью обугленной древесины при конденсации охлаждающихся паров окислов металлов, появляющихся в объеме либо при сгорании /элементоорганических соединений в составе продуктов пиролиза древесины/ или при испарении /окислов с горячей поверхности/. Поэтому мелкая фракция имеет очень малый размер частиц /порядка нескольких нанометров/ и невидима глазом. Мелкие частицы укрупняются при взаимной коагуляции или при осаждении на крупных частицах уноса. Мелкая фракция обогащена тяжелыми металлами и нежелательна для использования в качестве удобрения в сельском хозяйстве.

Летучая зола частично осаждается в дымоходах /совместно с сажей и конденсатом/, частично выносится в атмосферу. Унос пепла в дымоходы и в атмосферу считается нежелательным явлением. Это дает, в частности, еще один повод считать, что подовые топливники, обладающие пониженным золоуносом, более экологичны, чем решетчатые.

Подовая зола имеет вид крупинок, в том числе с формой и со структурой кусочков исходной древесины. При температурах выше 1200°C , например, в “предтопках” /рис.272-в/,

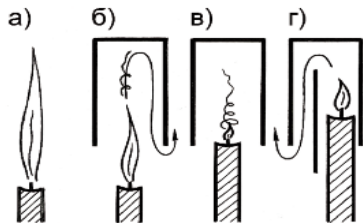
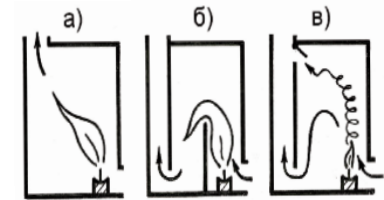


Рис.296. Пламя свечи гаснет в колпачке, но горит при разделении колпачка на каналы /дымообороты/ с помощью вертикальной перегородки.

Рис.297. Моделирование схемы топливника с помощью пламени горящей свечи /см. текст/.



подовая зола может частично спекаться, а зола от каменных углей способна даже расплавляться, образуя шлаки.

5.9. Сжигание летучих над дровами

Летучие выделяются из горящих дров либо в виде газов /паров/, либо в виде очень мелких жидких капель конденсата - тумана /белого дыма/.

Газообразные летучие /пары/ сгорают в воздухе гетерогенно в виде предварительно не смешанных с воздухом струй горячих газов в форме диффузионных пламен - факелов, языков огня /см. раздел 1.3.2/.

Жидкокапельные летучие /дымы-туманы/ требуют предварительного испарения капель. Образовавшиеся при этом смеси горячих паров с воздухом затем сгорают гомогенно в форме хаотично распространяющихся в топливнике фронтов пламени - всполохов /см. раздел 1.3.1/.

5.9.1. Сжигание газообразных летучих

Горение газообразных летучих начинается в микротопках между поленьями и продолжается над закладкой дров в виде известных языков пламени в объеме топливника. Ясно, что появление пламен над закладкой дров обусловлено неспособностью микротопок сжечь все выделяющиеся летучие. Это случается, когда летучих в микротопках выделяется слишком много, а воздуха в микротопки проникает слишком мало, то есть при низких коэффициентах избытка воздуха $0,2-1,2$ /при нехватке кислорода внутри горящей закладки дров/.

Особым случаем является сжигание окиси углерода над дровами, поскольку ее появление может быть обусловлено не только недогоранием пламен, но и восстановлением двуокиси углерода на углях.

5.9.1.1. Сжигание свободным пламенем

Пламена /горящие струи горячих газов/ вырываются из микротопок в объем топливника, а там коэффициенты избытка воздуха /величины “альфа”/ могут быть совсем иными, нежели в микротопках между дровами. При малых “альфа” пламена способны тухнуть /рис.296-297/, а

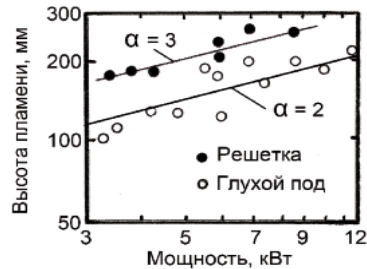


Рис.298. Высота пламен свободного костра в случае мелких дров на глухом кирпичном поде и на решетчатом поде [150]. Тепловые мощности пламени варьировались изменением диаметра костра. Замеры проводились при достижении устойчивых режимов горения. Каждая точка представляет собой среднее значение по 25 фотоснимкам, сделанным с 15-секундным интервалом. Экспериментальные точки сопоставлены с результатами “теплого” расчета для “избытков воздуха” α (степеней разбавления), численно равных 2 и 3 /см. текст/.

могут стать столь высокими, что выйдут из печи /как из газогенератора/ и догорают над устьем дымовой трубы.

При больших “альфа” над дровами /а этим и отличаются топливники печей от камер сгорания газогенераторов/ пламена с высокой полнотой догорают в

топливнике. При этом коэффициенты избытка воздуха могут быть различными в разных точках топливника /как и в разных микротопках между разными поленьями/. Вообще-то, правильней было бы говорить не о коэффициентах избытка воздуха, а о концентрациях кислорода в окисляющей газовой среде. Но печники часто оперируют понятием “коэффициента избытка воздуха”, поскольку оно имеет более житейский смысл - указывает, хватает или не хватает воздуха для горения.

Локальное значение коэффициента избытка воздуха определяют арифметическим расчетом исходя из результатов измерений локального химического состава осушенных дымовых /и не только дымовых/ газов, то есть исходя из реального соотношения концентраций газообразного горючего СН, кислорода O₂ и двуокиси углерода CO₂ в интересующей зоне. Так что, фактически каждому составу дымовых газов можно “приписать” некое значение коэффициента избытка воздуха.

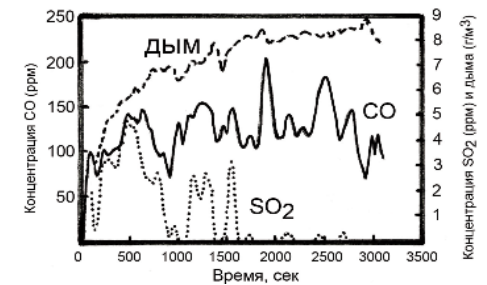
Коэффициент избытка воздуха	СН, % об.	O ₂ , % об.	CO ₂ , % об.
менее 1	более 0	0	более 0
1	0	0	21
2	0	10,5	10,5
3	0	14	7
бесконечность	0	21	0

Обычные газоанализаторы дымовых газов не определяют концентрацию углеводородов СН, а измеряют только концентрацию свободного кислорода в осушенном газе /иногда и концентрацию двуокиси и окиси углерода/, то есть определяют коэффициенты избытка воздуха, большие единицы. Методики пересчета измеряемых концентраций свободного кислорода в коэффициенты избытка воздуха основаны на формулах материального баланса химических реакций с учетом реального массового элементного состава топлива [17, 49, 117]. Однако, в большинстве случаев бытовым печникам для оценок достаточно ориентироваться на формальную химическую формулу целлюлозы C₆(H₂O)₅ как основного углевода древесины /см. раздел 1.1.3/, откуда следует, что и древесина, и углерод приблизительно эквивалентны в смысле состава осушенных продуктов сгорания /O₂ преобразуется в CO₂ без изменения объема /приведенного к “нормальной” температуре 0°С/.

Коэффициент избытка воздуха в печи - это величина не только расчетная, но и в общем-то весьма абстрактная /см. раздел 1.3.1/. Если в случае предварительно перемешанных газов /смесей воздуха с газообразным горючим/ коэффициент избытка воздуха может быть в принципе априори задан и затем реально создан смешением определенных количеств горючего и воздуха, то в случае горения предварительно неперемешанных газов коэффициент избытка воздуха “образуется сам собой”, и к тому же он всюду разный /и во времени, и в пространстве/.

Поэтому, коэффициент избытка воздуха в печи вынужденно измеряется именно в дымовой трубе, а не в топливнике /где он всюду разный/. Коэффициент избытка воздуха при этом свидетельствует лишь о том, что воздуха зашло в топливник в целом либо недостаточно /при малых величинах “альфа”/, либо избыточно /при больших величинах “альфа”/ для полного сжигания того количества горючего, которое в данный момент реально горит в топливнике. При этом, подчеркнем, никто не знает, какие конкретно массы горючих горят /и как горят/ в данный момент времени. Более того, никто не знает даже, как реально измерить этот мгновенный расход конкретных горючих /углей и летучих/.

Рис.299. Частный пример измерения концентраций окиси углерода, двуокиси серы и взвешенных микрочастиц /дыма, видимо, в основном белого/ над открытым свободным костром, используемым для приготовления пищи в помещении. Дно кастрюли расположено на треноге в 100 мм над подом. Диаметр костра 0,2 м, мощность костра 4-6 кВт, КПД в части нагрева воды в кастрюле 12-17% [151].



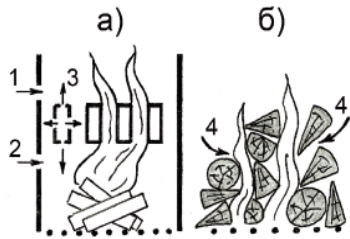


Рис.300. Рассечение горящих потоков газа /языков пламен/ на решетке (а) и в слое поленьев (б).

Условно считается, что “свободные” пламена /не касающиеся стенок и перекрытий топливника/ бездымно догорают над дровами в достаточно высоких топливниках при коэффициентах избытка

воздуха /определяемых именно по составу дымовых газов в дымовой трубе/ порядка полутора-двух и выше. А при коэффициентах избытка воздуха порядка двух-трех и выше, можно добиться низких /менее 1% об. = 10000 ppm/ концентраций окиси углерода CO в дымовых газах /имеется в виду режим пламенного горения дров в печи/.

Так, отечественный /отмененный с 1976 года/ стандарт ГОСТ 2127-47 предусматривал в проектируемых отопительных /кирпичных/ печах нормативный объем образующихся продуктов сгорания, равный 10 м^3 /в пересчете на “нормальную” температуру 0°C / на 1 кг дров влажностью 25%, что как раз соответствует значению коэффициента избытка воздуха порядка тройки /см. раздел 1.5/.

Европейский стандарт EN 13240 подразделяет твердотопливные комнатные обогревательные печи на классы по нормируемой величине концентрации окиси углерода CO в отходящих дымовых газах /класс 1 - менее 0,3% об., класс 2 - менее 1,0% об./, причем нормируется концентрация CO, пересчитанная именно на концентрацию свободного кислорода в дымовых газах 13% об. /что соответствует коэффициенту избытка воздуха порядка тройки/.

Аналогичный пересчет реальных концентраций окиси углерода CO в нормируемую величину /соответствующую концентрации кислорода 13% в отходящих газах/ предусмотрен и в других европейских стандартах EN 15250 на твердотопливные теплоемкие /кирпичные/ отопительные печи, EN 12815 на твердотопливные варочные плиты, EN 13229 на твердотопливные камины, EN 14785 на отопительные приборы на древесных брикетах, EN 15821 на твердотопливные печи для саун и др.

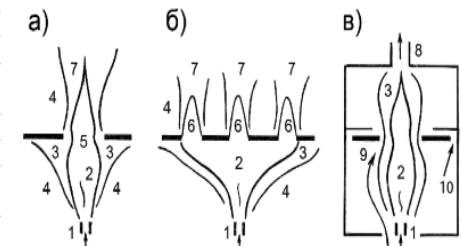
Напомним, что действующий отечественный стандарт ГОСТ 9817-95 ограничивает концентрацию окиси углерода CO в дымовых газах бытовых аппаратов на твердом топливе предельной величиной 4% /без указания величины коэффициента избытка воздуха/.

Максимальное предельно-допустимая концентрация CO в воздухе жилых помещений по санитарным требованиям составляет ПДК = $5 \text{ мг/м}^3 = 5 \text{ ppm} = 0,000005\%$ об./.

Поэтому печники стремятся повысить полноту сгорания летучих в первую очередь за счет достаточного поступления воздуха в топливник /см. раздел 5.3/. Однако, большие коэффициенты избытка воздуха в топливнике означают повышенные потери тепла с отходящими газами /то есть пониженные величины КПД/. Поэтому подачу воздуха в топливник желательно сокращать, в первую очередь исходя из того, что достаточные поступления свежего воздуха необходимы только именно в зоны горения в оболочках пламен /рис.249/, а не просто в объем топливника в целом. Действительно, даже в случае костров на открытых площадках /“на улице”, где имеются, казалось бы, неограниченные количества кислорода вокруг костра, наблюдаются черные дымления, свидетельствующие не просто о недогорании летучих, а о нехватке кислорода именно вокруг верхушек пламен.

Действительно, с повышением размеров-диаметров свободного костра /и соответственно мощности/ растет высота пламен /рис.298/. Увеличивается и толщина слоя продуктов сгорания в верхних зонах пламен /рис.39/, и костер начинает дымить из-за нехватки кислорода в верхушках пламен. При малых мощностях костра 5 кВт, характерных для кухонных очагов размером порядка 0,2 м, мелкие дрова дымят сильнее крупных /рис.299/. Причем костры на решетке имеют более высокие пламена, нежели костры на глухом поду /рис.298/. Это явление вызвано повышенным выходом летучих из дров на решетке. Но авторы [150] объясняют это якобы лучшим “перемешиванием” летучих с воздухом и/или ламинарностью пламен на решетке и/или образованием “огненных вихрей”. Подобные неправдоподобные объяснения /www.cookstove.net/ обусловлены тем, что авторы оперируют лишь чисто тепловыми теориями костров, рассматривающими пламена не как химически реагирующие в воздухе потоки горючего газа, а просто как свободно всплывающие дымовые газы из зоны горения дров. Так, вводя для костра особое понятие “избытка воздуха” /как степени разбавления горячих дымовых газов без существенного снижения подъемных сил/, получают ложный результат о росте высоты пламен с увеличением коэффициента избытка воздуха /как показателя концентрации кислорода вокруг пламени/.

Рис.301. Стесненные диффузионные пламена: а - свободно всплывающее пламя в отверстии, б - пламя, всплывающее через решетку, в - пламя в отверстии при наличии тяги. 1 - газовая горелка, 2 - газ, 3 - продукты сгорания, 4 - неподвижный воздух, 5 - сужение пламени, 6 - распределенный газ, 7 - вторичные продукты сгорания, 8 - тяга трубы, 9 и 10 - холодный воздух, засасываемый тягой трубы.



Таким образом, необходимо повышать коэффициент избытка воздуха именно в зоне пламен. И наиболее надежно это можно сделать спутным обдувом пламен свежим воздухом /рис.247/. Эффективность воздуха как окислителя повышается при этом за счет уменьшения толщины слоя продуктов сгорания вокруг пламени /рис.39/, в котором кислород воздуха вынужден диффундировать к зоне горения /см. раздел 1.3.2/.

5.9.1.2. Дожигание пламени стеснением в отверстии

Помимо обдувов пламен потоками вторичного воздуха встречаются и иные, весьма многочисленные предложения по дожиганию горючих газов, которые порой хоть и вызывают сомнения, но, тем не менее, хитроумны и интересны печникам, поскольку заставляют задумываться о физике горения газов в топливниках. Ввиду слабой изученности многих вопросов обозначим их лишь в перечислении с комментариями по сути /разделы 5.9.1.2 - 5.9.1.8/. Речь пойдет о соображениях в виде гипотез /то есть умозрительных моделей, порой даже воплощенных в конкретные технические решения-конструкции/, но не проверенных инструментально на достигаемый эффект. При этом полезность или вред одного и того же устройства может придумываться, объясняться и трактоваться по-разному с разных физических позиций. А одна и та же идея /и цель/ может воплощаться по-разному в разных конструкциях.

Так, например, было бы заманчиво отделить каким-либо образом слой продуктов сгорания от оболочки пламени и открыть тем самым "свободный" путь молекулам кислорода к зоне горения в оболочке. В частности, можно было бы пропустить пламена через некие отверстия

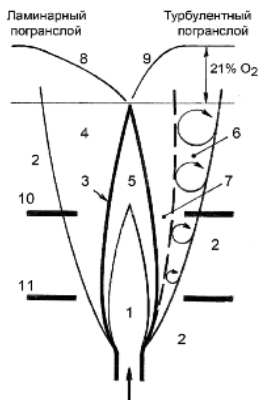
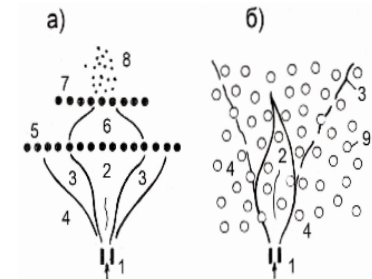


Рис.302. Структура пламени газовой горелки (слева - ламинарный медленно всплывающий пограничный слой продуктов сгорания, справа - турбулизованный быстро всплывающий пограничный слой продуктов сгорания): 1 - горючий газ, 2 - неподвижный воздух, 3 - оболочка пламени, 4 - ламинарно всплывающие продукты сгорания в смеси с воздухом, 5 - продукты сгорания в смеси с горючим газом /включая кончик пламени/, 6 - турбулентная зона всплывающих продуктов сгорания, 7 - ламинарная зона /подслой/ всплывающих продуктов сгорания, 8 - радиальный профиль концентрации свободного кислорода вокруг пламени при ламинарно всплывающих продуктах сгорания, 9 - радиальный профиль концентрации свободного кислорода вокруг пламени при турбулентно всплывающих продуктах сгорания, 10 - низкорасположенное отверстие, 11 - высокорасположенное отверстие.

Рис.303. Гашение диффузионного пламени, свободно всплывающего через решетки-сетки (а) и через зернистый слой (б): 1 - газовая горелка, 2 - горючий газ, 3 - продукты сгорания, 4 - неподвижный воздух, 5 - решетка /сетка/ первичная нижняя, 6 - газ, всплывающий сквозь нижнюю решетку, 7 - решетка вторичная верхняя, 8 - дым черный, 9 - гранулы /например, засыпка камней/.



так, чтобы сами пламена проходили бы, а внешний слой продуктов сгорания "сдирался бы как кожура" /не пропускаться бы дальше/ и проходил бы через какие-нибудь иные, например, соседние отверстия /рис.300-а/.

Однако, попытка пропустить пламя свечи /или, к примеру, газовой зажигалки/ через отверстие покажет, что уже при диаметре пламени в два раза меньшем диаметра отверстия возможно появление черного дымления кончика пламени /рис.301-а/. То есть пламя, казалось бы, свободно прошло /в смысле "поместилось"/ в отверстии, но, тем не менее, это "безконтактное" взаимодействие заметно повлияло на процесс горения. Причем повлияло только в том случае, если в отверстие входит именно верхняя половина пламени /то есть, в случае высоко расположенного отверстия/. А это значит, что возмущение наблюдается в участках пламени с развитым слоем продуктов сгорания /рис.302/.

Область диффузионного горения не ограничивается светящимся контуром "языка пламени", но затрагивает и окружение /рис.39/. Струя горячего газа 1 горит в окружающем воздухе 2 на границе раздела 3, представляющей собой светящуюся оболочку пламени. Возникающие продукты сгорания образуют слой 4 в смеси с воздухом 2 и слой 5 в смеси с горючим газом 1 /рис.302/. Молекулы кислорода вынуждены диффундировать через слой продуктов сгорания 4, называемый "пограничным слоем пламени". Горячая оболочка 3 /вместе с горячими слоями 4 и 5/ всплывает вверх под действием сил Архимеда, образуя вертикально ориентированный факел. Всплывающие горячие газы увлекают за собой вверх не только "холодный" горючий газ 1 внутри оболочки, но и холодный неподвижный воздух 2 вокруг пламени. При увеличении линейной скорости всплывания увеличиваются силы сдвига /внутреннего трения/ между всплывающими продуктами сгорания и неподвижным воздухом, в результате чего в слое 4 может появиться зона турбулентности 6. В этой турбулентной зоне кислород может затягиваться поближе к оболочке за счет вихревых потоков воздуха /а не только за счет молекулярной диффузии/. Градиенты концентрации кислорода 8 при этом возрастают 9, вследствие чего диффузионное поступление кислорода в оболочку увеличивается, что способствует догоранию газов и частиц сажи в верхушке пламени 5, сильно разбавленной продуктами сгорания.

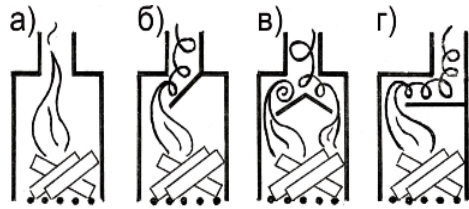


Рис.304. Вспыхивание пламени при резких поворотах за преградой.

Действительно, если слой продуктов сгорания 4 целиком проходит через отверстие /нижнее 11 на рис.302/, то пламя “не чувствует” отверстия. А если слой горячих продуктов сгорания 4 сталкивается с краями отверстия /верхнего 10 на рис.302/, то он тормозится, накапливается “горкой” горячего газа снизу /рис.301-а/, создавая тем самым давление, способное направить потоки горячих продуктов сгорания в стороны для растекания вдоль по потолочной поверхности в соответствии с гидравлической аналогией /рис.106/. Как раз в этом месте слой продуктов сгорания вокруг пламени утолщается /вопреки нашему желанию утоньшить слой/, что еще сильнее затрудняет диффузию молекул кислорода к оболочке пламени.

Более того, из-за возникающего повышенного давления в заторможенной зоне /в “горке” 3, см. рис. 301-а, рис. 303-а/, появляется и радиальный поток продуктов сгорания не только от оси, но и к оси пламени /а затем в отверстие/, сжимающий пламя в соответствии со сдвливанием истекающей струи по гидравлической аналогии /рис.117/.

Кроме того, торможение потока продуктов сгорания приостанавливает турбулизацию погранслоя, что еще больше ограничивает доступ кислорода к зоне горения. В результате, процесс горения в оболочке пламени от нехватки кислорода увядает, горящая оболочка как непреодолимая разделительная граница между горючим газом и воздухом может разрушиться, и “остатки пламени” /все еще раскаленные углеводороды, продолжающиеся термически разлагаться/ могут беспламенно “вывалиться” изнутри факела в воздух в виде черных дымлений. Свободно всплывшее через отверстие пламя /с разрушенным слоем продуктов сгорания/ все же может в отдельных случаях продолжить горение, однако уже “заново” в новых условиях - с “новым” неподвижным воздухом и “новыми” продуктами сгорания 7 /рис.301-а/.

Ситуация кардинально меняется при наличии напора дутья /снизу/ или тяги трубы /сверху/, то есть при наличии перепада давления на отверстии. Дело в том, что всплывать “свободно” /то есть самопроизвольно за счет сил Архимеда/ вверх в отверстие способны лишь горячие газы /то есть оболочка и слой продуктов сгорания/, а холодный воздух, окружающий пламя, не всплывает и через отверстие пройти не может. А при напоре /то есть, при наличии избыточного давления ниже отверстия/ или тяге /то есть, при наличии разрежения над отверстием/ через

отверстие принудительно просасываются и потоки воздуха 9 и 10 /рис.301-в/, что может обеспечить горение пламени в более узких отверстиях, нежели при отсутствии напора или тяги. По той же причине, горящие пламена способны проникать в фильтрующие каменки только при наличии тяги /в том числе и самотяги горячей каменки/, когда в каменку может проникать свежий воздух на горение.

Сжатие потока дымовых газов в отверстии отвечает интуитивному желанию печников собрать воедино все “болтающиеся из стороны в сторону” горячие пламена и холодный задымленный воздух, чтобы именно в этой горячей зоне дожечь летучие /см. раздел 5.9/, в том числе и с помощью дополнительного воздуха /рис.252, рис.301-в/. Но, к сожалению, белый дым в основном наблюдается как раз при растопке печи /пока нет тяги трубы и когда стесняющие отверстия нежелательны/.

5.9.1.3. Дожигание пламен в ансамбле стесняющих отверстий

Влияние одиночных стесняющих отверстий и ансамблей стесняющих отверстий /в виде решеток, сеток, слоев гранулированных-кусковых материалов, например, каменных засыпок/ не ограничивается простым механическим стеснением пламен. Отверстия и решетки способны турбулизировать воздух, могут рассекают пламена на части /рис.301-б/, сужать /рис.301-а/ или расширять /рис.303-а/ пламена, могут увеличивать газодинамическое сопротивление топливника и снижать расход воздуха через печь /и влиять тем самым на процесс горения дров/.

Кроме того, отверстия немислимы без горизонтальных поверхностей, в которых они выполнены. И эти перфорированные поверхности тоже воздействуют на общую обстановку в топливнике. Так, в частности, поверхности с отверстиями /решетки/ и поверхности с каналами /слои гранулированных материалов/ могут сильно разогреваться и превращаться в источники теплового излучения, возвращающие тепло в топку, в том числе и на нагрев и газификацию дров. Поверхность с отверстиями может накапливать под собой /как потолок/ газообразные летучие с изменением характера горения /рис.301-б/, особенно в случае мелких сеток /рис.303-а/. Многофакторность воздействий решеток порой сильно усложняет анализ топочных процессов.

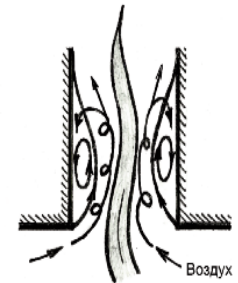


Рис.305. Пламя в месте турбулентного сужения /см. рис.118/.

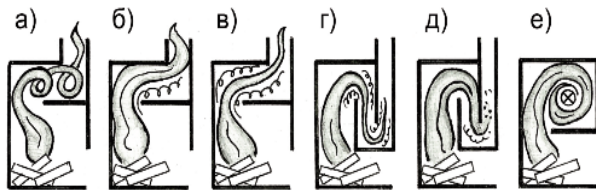


Рис.306. Пламена за преградой /см. текст/.

Во-первых, решетки действительно способны “дробить”

пламя на части /рис.58/ с получением из одного высокого пламени множества низких пламен /рис.49/. И это “дробление” может условно пониматься как некое смешение, но не молекул газов, а потоков воздуха и потоков горючих газов /рис.301-б/. Ведь тоненькая струйка горючего газа сгорает в воздухе легче /”быстрее и чище”/, чем толстая струя.

При этом под “дроблением” пламени понимается не просто обтекание потоком горящего газа препятствия, которое может происходить с рассечением, а затем вновь со смыканием в единый поток с сохранением исходной оболочки пламени /рис.303-а/. “Дробление” пламени подразумевает возникновение из одной горящей струи газа именно нескольких раздельно горящих струек, а это возможно лишь в том случае, если за преградой имеется доступ воздуха в зоны между новыми струйками /рис. 301-б/.

Напомним, что рассеченные пламена способны вновь объединяться. Пламена не обладают способностью отталкиваться друг от друга. Наоборот, в местах взаимного контакта, где ощущается нехватка кислорода, пламена стремятся слиться воедино.

Во-вторых, для заметного снижения высоты пламен “дробящая” решетка должна вступать в действие как можно раньше, то есть должна устанавливаться как можно более низко над дровами или даже внутри закладки дров, что практически трудноосуществимо /из-за неудобства обслуживания/ и даже порой бессмысленно, поскольку роль решетки неизбежно играют сами поленья в закладке дров, причем с возможностью подсоса воздуха к пламени с боков /рис.300-б/. Фактически в топке и без решетки имеется “частокол” пламен в потоке воздуха.

В-третьих, высоко расположенные решетки не только не способны существенно снизить высоту пламен, но могут и тушить кончики пламен с появлением черных дымлений /рис.58/. Напомним, что кончики диффузионных пламен содержат сильно разбавленный горючий газ и с легкостью дымят при касаниях к поверхностям /на потолках и стенках топливника и дымоходов, на решетках, в каменных засыпках/ скорее от нехватки кислорода, нежели от захлаживания. А в зоне кончиков пламен как раз и затруднен доступ кислорода к зоне горения из-за большой толщины слоя продуктов сгорания /рис.39/.

В-четвертых, сажа в виде копоти /сажистых отложений/ может выделяться на поверхностях /в том числе и на раскаленных решетках/, касающихся не только верхних, но и нижних зон “дровяных” пламен /в отличие от газовых пламен и пламен стеариновых свечей/. Это обусловлено тем, что газообразные летучие выходят из обугленных поленьев уже в раскаленном виде с наличием микрочастиц сажи, придающих пламени желтый цвет с самого основания.

Это явление широко известно по копоти на котелках, подвешиваемых над дровяными кострами, и на кастрюлях, устанавливаемых на открытых конфорках дровяных варочных плит. Иногда появление копоти трактуется как “экологически” полезное улавливание частиц сажи из дыма, тем более, что иногда имеется возможность потом медленно окислить /”выжечь”/ сажу при последующем нагреве решетки до высоких температур порядка 400-500°C. Однако, поверхности не просто осаждают копоть /неизвестно, где образовавшуюся/, а сами способствуют ее образованию /см. раздел 1.3.5/.

В-пятых, тушение пламени происходит не только из-за ограниченности доступа кислорода к оболочке. С уменьшением размера отверстий могут расти и тепловые потери из оболочек пламен. Так что пламена могут потухнуть также и по чисто энергетическим причинам [147]. Приведем для сведения величины критических диаметров пламягазящих каналов d_n для стехиометрических предварительно подготовленных смесей горючего газа с воздухом по ГОСТ 12.3.047-98 /для диффузионных пламен критический размер зазоров еще больше/:

Газ	водород	метан	пропан	бензин	ацетон	уайт-спирит	окись углерода
d_n , мм	0,89	3,50	2,60	2,80	2,45	2,45	3,04

Все эти явления можно проследить на модели “столовых вилок в пламени свечи”. Если через один ряд зубьев вилки пламя еще может пройти, то через два ряда зубьев /расположенных, например, крест-накрест/ пламени пройти трудно /рис.303-а/. Но потухшие горючие газы свободно проходят через зубья /в негорящем состоянии/, и их удается порой вновь поджечь спичкой. Такие же явления происходят и в зернистом слое, например, в каменных засыпках банных печей /рис.303-б/.

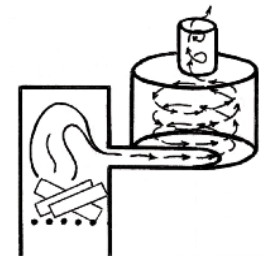


Рис.307. Вихревой “дожигатель пламен” /И.В.Васильев/.

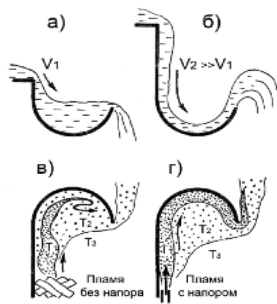


Рис.308. Влияние инерционности на поведение водных потоков /гидравлическая аналогия/ и горячих газовых потоков /пламен/: а - низкоскоростной водный поток имеет малую инерционность, тормозится и заполняет водопримемник /бьеф/, б - высокоскоростной водный поток имеет большую инерционность и "выскакивает" из водопримемника /гидравлический прыжок/, в - низкоскоростное пламя от костра заполняет колпак, г - высокоскоростное пламя от газовой горелки "проскакивает" колпак $T_1 > T_2 > T_3$.

В-шестых, при малом размере отверстий набегающее пламя 2 "растекается" по решетке в виде "потолочного" пламени, порой образуя вторичные пламена б /рис.301-б/, а порой и не образуя. Потолочное пламя ведет себя совсем по-иному, нежели ничем не стесненное свободно всплывающее пламя. Потолочное пламя вынуждено растекаться по потолку по горизонтали "как река", доступ воздуха к оболочке пламени затруднен как снизу /из-за отсутствия вертикальных потоков воздуха/, так и сверху /через решетку или зернистый слой/, пламя краснеет, коптит.

В-седьмых, свободно всплывающее пламя, проникшее в слои решеток /рис.303-а/ и в зернистые слои /рис.303-б/ развивается в практически неподвижном воздухе, поскольку эжекция /увлечение/ воздуха пламенем, характерная для нестесненных пламен, затруднена. Затруднена также и крупномасштабная турбулентность, взвихривающая пограничный слой пламени. Это обуславливает затрудненный транспорт кислорода в оболочку пламени. Пламя в этих условиях коптит и затухает. Принудительный проток воздуха, обусловленный напором или тягой, способствует горению, но не способен обеспечить крупномасштабную турбулентность в слое гранулированного материала /см. раздел 5.7.1.5/.

5.9.1.4. Дожигание пламен "смешением" с воздухом

В печной практике в разные годы выдвигались многочисленные рекомендации по интенсификации горения пламен над дровами путем "лучшего смешения горячих газов с воздухом".

Так, например, предлагалось "смешивать" газы в топливнике разного рода решетками, в том числе и с подачей "пронзающих" струй вторичного воздуха в пространственную зону над решеткой 1, под решетку 2 или в зазоры (отверстия, промежутки, прозоры) решетки 3 /рис.300-а/.

Предполагалось, что решетки в потоке газов "с очевидностью" способствуют механическому "смешиванию" /по аналогии ложки в стака-

не/ горючих газов с воздухом. Под смешением горячих газов с воздухом понималось, видимо, перемешивание молекул горячих газов с молекулами воздуха, что и содействует их химическому взаимодействию, а значит и снижению высоты пламен. Поэтому такие "смешивающие" решетки в топливнике печники иногда условно называли "катализаторами" горения, хотя каталитическая роль таких "перемешиваний" никем пока экспериментально не доказана /см. далее раздел 5.9.4/.

Предложения печников "по лучшему смешению газов" были издавна основаны на невнятном понимании пламен, существовавшем до разработки тепловых теорий воспламенения и горения газов [152-154]. Так, например, даже в научных изданиях пламена над дровами порой понимались как "смеси раскаленных газов, вступающих между собой в реакции горения" [60], причем "молекула газа, увлекаемая тягой, летит и в то же время горит...и важно, чтобы каждая молекула газа, выходя из куска топлива, загораясь и двигаясь, могла бы сгореть" [117]. То есть предполагалась, видимо, говоря современным языком, некая модель гомогенного горения горючей смеси /из предварительно перемешанных молекул горячих газов и молекул воздуха/, причем принималось, что молекулы где-то были "хорошо перемешаны" /видимо, в зонах пламен/, а где-то "недостаточно перемешаны" /видимо, между пламенами/. И для более быстрого и полного сгорания надо, якобы, продолжать дополнительно перемешивать молекулы горячих газов и воздуха в ходе горения.

Конечно же, одиночная молекула газа "гореть" не может - горят смеси газов /ансамбли молекул, поочередно вступающих в реакцию/ или границы раздела газов. А языки пламени от дров в печи - это не потоки перемешанных смесей горячих газов с воздухом /горящие гомогенно/, а потоки горячих газов, горящие во внешнем воздухе гетерогенно на границе раздела горючего газа и воздуха. И надо не перемешивать газ с воздухом, а интенсифицировать подачу газа и кислорода в эту границу раздела. Механически же перемешать кислород с горючими газами, горящими диффузионным пламенем, принципиально невозможно, поскольку горячие газы внутри факела отделены от окружающего воздуха горячей границей раздела /оболочкой пламени/, где концентрации горячих газов и кислорода равны нулю. И молекулы кислорода не могут "проскочить" через эту

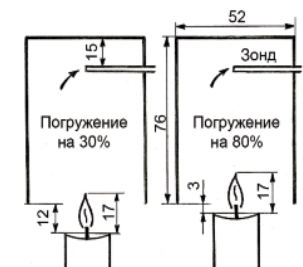


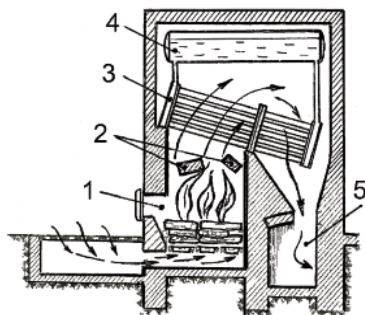
Рис.309. Схема эксперимента "свеча тухнет в колпаке".

оболочку, поскольку это означало бы появление горения внутри оболочки и отвечало бы простой сдвигке месторасположения оболочки горения к оси факела /языка пламени/. Можно изменить форму оболочки диффузионного пламени /например, обдувом обтекающими воздушными потоками/, но сделать оболочку горения газопроницаемой /для смешения горючих газов с воздухом/ невозможно.

Механически перемешать молекулы горючих газов с молекулами воздуха можно, только погасив пламя /устранив горящую оболочку/. А после смешения образовавшуюся горючую смесь газов вновь поджечь. Такой процесс крайне не устойчив, но порой наблюдается в виде спонтанных всполохов огня над решетками или в камерах дожигания [112].

Строго говоря, в диффузионных пламенах над дровами все-таки происходит образование горючих газовых смесей /из молекул горючего газа и молекул воздуха/, поскольку граница раздела горючего газа и воздуха в любом случае с неизбежностью “размыта” за счет взаимопроникновения молекул. При этом перемешивание молекул горючих газов с молекулами воздуха в пламенах над дровами происходит диффузионно путем хаотического /броуновского/ движения молекул через слой контакта /поверхность раздела/ горючего газа и воздуха. Образующиеся и постоянно обновляющиеся молекулярные смеси тотчас сгорают, образуя светящуюся оболочку пламени. То есть горючие газовые смеси в диффузионных пламенах все же создаются, но создаются не заблаговременно, а непосредственно во время /в ходе/ горения.

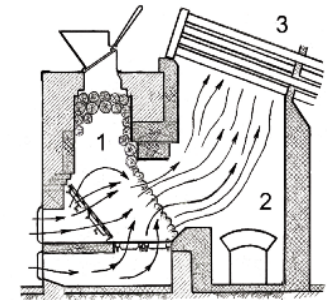
Факт смешения горючих газов с воздухом в оболочке пламени наглядно обнаруживается при уменьшении скоростей реакций окисления за счет снижения температуры оболочки пламени ниже 1000°C , например, при разбавлении воздуха продуктами сгорания, в частности под сводами русских печей /см. раздел 5.9.1.7/. Тогда оболочка пламени может стать не просто “холодной” /красно-дымной/, но и “толстой” /пространственно размытой/. Но



этот режим горения пламен “с повышенным перемешиванием газов” /как у свода русской печи/ тем не менее не обеспечивает автоматического повышения полноты сгорания, а наоборот, зачастую ведет к повышенному дымлению.

Рис.310. Топка котла с прямой теплоотдачей [117]: 1 - топка, 2 - “своды” - теплоизлучающие элементы /“отражатели тепла”/ для нагрева горящих дров, 3 - котел водотрубный, 4 - барабан /бак с водой/, 5 - боров /дымовой канал, дымоотвод/.

Рис.311. Котельная установка с выносной топкой [117]: 1 - топка выносная, 2 - камера дожигания, 3 - котел водотрубный.



Для ускорения диффузионного перемешивания горючего газа с воздухом желательно было бы тотчас удалять образующиеся продукты сгорания из зоны горения, затрудняющие “контакт газов”. Именно удалять продукты сгорания, а не пытаться уничтожить сам слой продуктов сгорания, поскольку в тщетной попытке удалить слой продуктов сгорания мы уничтожим саму границу контакта. А удаление продуктов сгорания из зоны горения /из оболочки пламени/ возможно лишь диффузионным путем за счет хаотического броуновского движения молекул в стороны /так же как и поступление исходных реагентов в зону горения/.

Таким образом, для повышения скорости горения в пламенах надо ускорить процессы массообмена - диффузию исходных реагентов горения в оболочку и диффузию продуктов сгорания из оболочки пламени.

5.9.1.5. Дожигание пламен ускорением потока

Как уже отмечалось, величины диффузионных потоков исходных реагентов и продуктов сгорания в пламенах могут быть увеличены истончением слоев продуктов сгорания вокруг пламен, например, при спутном обдуве пламени потоком воздуха /рис.247-а/, при разбиении пламен /рис.301-б/, при турбулизации пограничного слоя /рис.302/.

Мыслима также возможность утоньшения слоев продуктов сгорания за счет уменьшения диаметра пламени при “ускорении пламени” в сужающемся канале /рис.304-а/. Имеется в виду, что ускоряющийся газоздушный поток /а также пламя, которое расположено в этом потоке/ уменьшается в диаметре, то есть сужается. При этом в пламени увеличиваются градиенты концентрации горючих газов и кислорода. А это способствует ускоренной диффузионной подаче реагентов в оболочку пламени, а, значит, приводит к уменьшению продолжительности горения.

Подобные предложения по интенсификации горения в пламени вызывают порой отторжение у печников, поскольку многие видели, что если пламя проходит через хайло в канал, то возможно появление дымления в канале, поскольку в узком канале “нет условий для горения” /нет “простора-объема и продолжительности-времени”/. Имеется в виду, что в

узком канале время пребывания /то есть горения/ мало, имеется усиленное охлаждение газового потока /повышенный теплоотвод от пламени/ и, кроме того, нет достаточного количества кислорода.

Действительно, при свободном всплытии пламени в канал возникают затруднения с обеспечением пламени кислородом, точно так же как в случае стесняющих отверстий /рис.301-а/, поскольку холодный воздух вверх за счет сил Архимеда самопроизвольно всплыть не может /см. конец раздела 5.9.1.2/, и пламя без сопровождения воздухом увядает.

Но если речь идет о заходе пламени в канал с напором или с тягой /рис.301-в/, то есть о течениях “водопроводного” типа в герметичных аппаратах, то в канал может засасываться и воздух, порой в достаточном /и даже избыточно большом/ количестве. Действительно, если засосать пламя от дров /или от свечи/ в холодную узкую трубку пылесосом, то пламя отнюдь не погаснет, а разгорится /добела или до синевы/, укоротится и “сгорит” даже не зайдя глубоко в трубку. При этом догоранию газов в оболочке пламени способствуют и радиальные сжимающие потоки воздуха при входе в канал, так и возникающие турбулентности потока воздуха /рис.115, рис.118, рис.305/. В этом отношении влияние канала похоже на влияние отверстия /рис.301-в/.

Процесс горения пламени может распространяться и далеко по каналу. Так, в металлических печах в режиме интенсивного горения дров неоднократно наблюдалось прохождение пламени из топки через всю дымовую трубу с догоранием огненного факела в атмосфере над дымовой трубой. В частности, А.П.Ферингер описал огневой процесс прямо в дымовой трубе с аномально сильным разогревом стенок трубы. Аномальных дымлений при этом не наблюдалось.

В любом случае, нежелательно допускать наличие нескольких дымо-выводящих каналов, поскольку пламя может пойти в один канал, а воздух может пойти в другой канал, и контакт пламени с воздухом нарушится. Это может повлиять не только на горение языка пламени /горения газового потока/, но даже и на процесс горения закладки дров в топке, поскольку

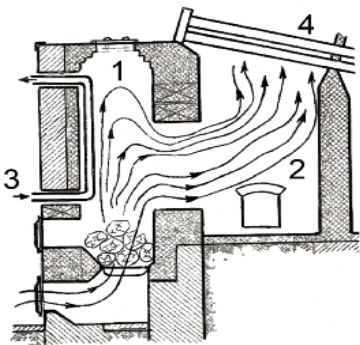
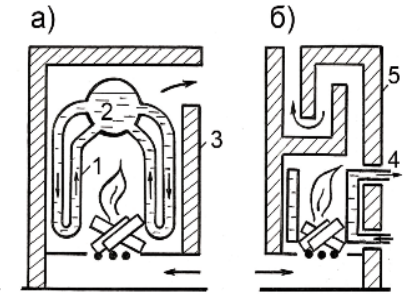


Рис.312. Топка котла с водоохлаждаемыми теплоемными элементами /экранами/: 1 - топка выносная, 2 - боров для отвода дымовых газов, 3 - экран /водотрубный котел в топке/, 4 - котел водотрубный.

Рис.313. Водоохлаждаемые теплоемные элементы /экраны в виде котлов/ в топке: 1 - экран /водотрубный котел в топке/, 2 - бак /барабан/, 3 - обмуровка, 4 - котел типа “чемодан” в топке бытовой печи, 5 - теплоемная конвективная система.



пламена могут случайным образом подводить дымовые газы то к одному, то к другому дымоотводящему отверстию, что вызывает неконтролируемые изменения траектории воздушных потоков в топке /в частности, воздух может пойти мимо дров/. А если канал один, то воздух неизбежно вынужден сопровождать пламя.

Так что при малой тяге воздух в канал может не поступать /весь входящий в канал газовый поток представлен пламенем и слоем продуктов сгорания/, и пламя при входе в канал увядает с дымлением. При усилении тяги воздух может зайти в канал /может быть в достаточном для горения количестве/, и горящее пламя может проникать глубоко в трубу. При сильной тяге пламя может догорать прямо при входе в канал.

Имеются рекомендации поддерживать высокую температуру стенок канала не ниже 400°C для предупреждения потуханий и дымлений. При этом бывает неясным, что может обеспечить высокая температура стенок - либо снижение теплопотерь из пламени, либо нагрев воздуха, либо предотвращение турбулизации окружающего пламя воздушного потока /за счет повышения вязкости воздуха при нагреве/, либо создание достаточной тяги в трубе и необходимое повышение расхода воздуха в канале, либо вторичные самовоспламенения газов при случайных потуханиях пламени. Напомним, что для горения языка пламени /не дров, а именно пламени - горящего потока горючего газа/ нет необходимости в горячем окружении - нужно лишь наличие достаточного количества воздуха /что видно по горению пламени спички на морозе/. Но при пространственном стеснении температура способствует горению [147].

5.9.1.6. Дожигание пламен закруткой

При ускорении пламена хоть и сгорают быстрее /”в секундах”/, но за счет вытягивания пламени “кишкой” вдоль по потоку сгорают на большей длине. То есть ускоренные пламена могут потребовать для дожига длинных каналов, что не совсем удобно в конструкторском отношении.

Для уменьшения размеров “каналов дожигания”, заманчиво было бы уложить пламена петлями-завитушками /“пустить по кругу”, “закрутить в спираль”/, чтобы уменьшить габариты зоны горения. Речь идет не о взвихрении пламен за счет турбулизации горящего газа и окружающего воздуха в скоростных потоках /рис.52/. И не о затягивании пламен в малую по размеру турбулентную зону при входе в канал /рис.305/. Речь идет просто об искривлении траектории газовых потоков, которое может мыслиться и в ламинарном виде. Так, можно направить ускоренное пламя тангенциально в цилиндрический аппарат циклонного типа /рис.307/, где пламена по инерции движутся вдоль по стенкам, постепенно стремясь к оси вращения, то есть постепенно “всплывая” в поле центробежных сил /рис.126/. При этом проявляется инерционность газовых потоков, в данном случае именно пламенных /резко неизотермических, химически реагирующих/. Так, ускоренное пламя может чисто по инерции “проскочить” через колпак, в отличие от неускоренного пламени, способного всплывать только вверх /рис.308/. То есть для закрутки пламени необходимо затрачивать большие перепады давления, поскольку для обеспечения инерционности необходимо ускорить потоки газов. А значит, идея закручивания пламен подразумевает наличие аппарата “водопроводного” типа с достаточно большой тягой.

Закрученности потоков возникают, в частности, при огибании препятствий, например, в случае горизонтальных дымооборотов - “козырьков” /рис.304/. При этом происходит крупномасштабное вихреобразование /рис. 306-а/, а не мелкомасштабная взвихренность окружающего воздушного потока /рис 306-б/. Как показал А.П.Ферингер, для закрутки требуется специальная форма “камеры закрутки” с тангенциальным вводом пламени и осевым выводом дымовых газов /рис.306-в/.

Пламя в потоке воздуха всегда стремится спрямиться как вязкий поток в низковязком потоке, превратиться как-бы в длинный эластичный

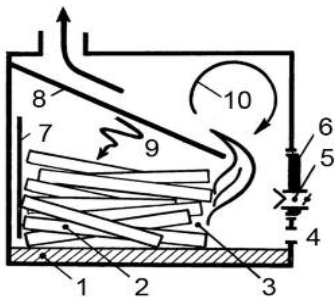
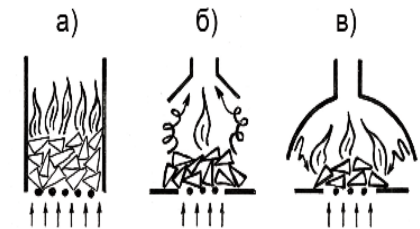


Рис.314. Пример металлической печи с дожигательной камерой: 1 - глухой под /например, из шамотного кирпича/, 2 - закладка дров, 3 - зона бокового горения, 4 - отверстие для подачи первичного воздуха /в частности, “растопочного”/, 5 - отверстие для регулируемой подачи вторичного воздуха /в частности, для режима длительного горения/, 6 - дверка топливника, 7 - экран лучистого нагрева боковой, 8 - горизонтально-наклонный дымооборот, 9 - поток лучистого тепла с поверхности дымооборота, 10 - камера дожигания.

Рис.315. “Зонтики” пламен над дровами.



чулок, наполненный “легким” керосином, в потоке “тяжелой” воды, где на каждый случайно возникший завиток действует спрямляющая сила направленного потока, и где именно кончик пламени /“хвост”/ тянет-выпрямляет все “тело” пламени. Ведь пламя /как горящий, химически быстро реагирующий газовый поток в потоке воздуха/ представляет собой автономное не перемешиваемое образование, которое должно где-то начаться /входом в поток воздуха/ и где-то заканчиваться /либо полным сгоранием либо распадом с недогоранием и с дымлением/. Пламя ведет в потоке воздуха как инородное тело, как шнур в водопроводной трубе - способно искривляться /трепетать-виться как флаг на ветру/ от малейших дуновений окружающего воздуха и может даже рваться на догорающие куски. Но свиваться из однонаправленных жгутов-шпагатов в возвратно-поступательные петли-спирали /с появлением встречных потоков/ может лишь при определенных обстоятельствах - либо под действием чисто инерционных сил, либо за счет конкуренции инерции и вязкости /турбулентности/.

Так, при низких скоростях потока пламя стремится в свободном всплытии расплаться /расстлаться/ по потолку с возможным появлением в окружающем /сопровождающем/ воздухе слабых турбулентностей эжекционного типа, то есть за счет вязких увлечений воздуха пламенем /306-б/. При повышенных скоростях потока уже начинают преуалировать силы инерции - скорости потоков становятся больше скоростей свободного архимедова всплытия. При этом в случае набегания газовых потоков на поверхности начинают создаваться значительные давления торможения, разворачивающие потоки вдоль извилистого канала. В результате, пламена начинают стремиться двигаться по геометрической оси канала - “по фарватеру” с возможным появлением турбулентностей окружающего воздуха за счет изменений направлений движения за преградой /рис.306-в/. А при очень больших скоростях в окружающем воздухе возникает турбулентность Рейнольдса - турбулентность “прямой трубы”, воздействующая и на само пламя. При этом дымление, наблюдаемое при касании пламени стенок, наблюдается как раз при низких скоростях потока /рис. 306-б, рис.306-д/.

В заключении отметим, что взвихренности за козырьком /рис.304/ часто мыслятся как средство для интенсификации передачи тепла от

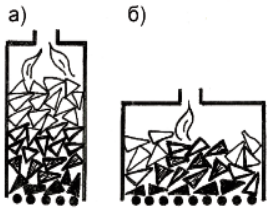


Рис.316. Высокий узкий "шахтный" (а) и низкий широкий "сплюснутый" (б) топливники.

дымовых газов к стенкам. Но для повышенной теплоотдачи нужны не только повышенные коэффициенты теплопередачи от газа к поверхности, но и повышенные перепады

температур. То есть, нужны холодные стенки канала для обеспечения возможности воспринять тепло горячих дымовых газов /необходима способность стенок не просто нагреться, но затем тут же и охладиться путем отвода тепла в удаленные точки целевого теплоусвоения/. Как раз об охлаждении стенок в местах турбулизации горячего газового потока печники часто забывают. Впрочем, остаются еще возможности использовать повышенные температуры козырьков для создания обратных потоков лучистого тепла для нагрева дров в топливнике.

5.9.1.7. Дожигание пламен под раскаленными сводами

Широко известны предложения В.Е.Грум-Гржимайло создавать в подсводовых пространствах "мешки горячих газов", где "в условиях неподвижного пыла за счет высокой температуры можно развить реакции дожигания последних следов горючих в форме пламени во всей массе печных газов без ясно выраженных факелов" [49,60,95].

Эти предложения прозвучали применительно к пламенным металлургическим печам с относительно низким сводом /отражательным/, имеющим и раскаленную поверхность, и проток воздуха /рис.228/. В последствии, эти идеи стали порой неоправданно распространяться и на колпаки в топках бытовых печей, хотя там, как правило, не достигаются необходимые температуры /хотя бы 800°C/, отсутствует проток воздуха и порой не поддерживаются достаточные концентрации кислорода.

Поясним ситуацию на следующем модельном примере. Парафиновая свеча в свободном пространстве горит в невозмущенной атмосфере воздуха абсолютно стабильно и практически с полным сгоранием паров парафина /рис.296-а/. Но при погружении в колпак / в "перевернутый стакан"/ пламя свечи сначала удлиняется /из-за снижения концентрации кислорода вокруг пламени/, затем укорачивается /из-за ограничения подачи расплавленного парафина/ и начинает коптить из-за нехватки кислорода /рис.296-б/, а потом вообще угасает /рис.296-в/. Но если организовать постоянный поток свежего воздуха в колпак путем обустройства

"дымооборота" с помощью вертикальной перегородки, то свеча благополучно горит неограниченно долго без копоти, не погасая /рис.296-г/.

Замеры зондовым газоанализатором параметров газов над свечой /С.В.Кириллов/:

Высота над пламенем	T, °C	O ₂ , %	CO ₂ , %	CO, ppm	Альфа
5 мм	600	18,0	3,0	60	12
10 мм	270	19,5	1,5	28	27
15 мм	100	20,0	1,0	7	46

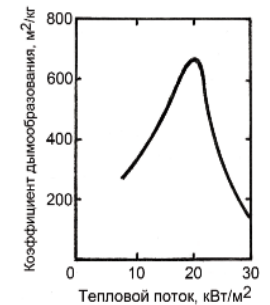
При погружении же пламени свечи в "перевернутый стакан" /жестяную банку диаметром 52 мм и высотой 72 мм/ на 30% горение продолжалось, но фитиль обгорал /истлевал/, видимо, из-за замедления скорости подачи расплавленного жидкого парафина в хлопчатобумажный фитиль. При погружении же пламени на 80% пламя быстро темнело и начинало постепенно угасать без дымления /рис.302/.

Погружение на 30%	450	14	7	50	3
Погружение на 80%	300	11	10	200	2

Аналогичные явления наблюдаются и в топках печей - проточные топливники обеспечивают "догорание" пламен, а беспроточные колпаковые конструкции в верхней части топливника могут затруднять "догорание пламен" из-за нехватки кислорода для "дожига кончиков пламен" /рис.297/. Поэтому в колпаковых печных системах желательно предусматривать верхние выпускные отверстия, открывая которые, можно было бы организовывать доступ воздуха в верхнюю часть колпака (то есть вентилировать колпак, делать его хотя бы частично проточным) "для догорания верхушек пламен" /рис.297-в/.

В то же время, в колпаках могут сохраняться достаточно высокие концентрации кислорода /порядка 10% в вышеприведенном примере "свечи в банке"/. Это говорит о том, что даже при столь высоких концентрациях кислорода диффузионное гетерогенное пламя самопроизвольно гаснет /раздел 1.3.2/. Но с погасанием диффузионного пламени начинается перемешивание остатков горючих газов с остатками кислорода, что открывает возможность дожечь горючие газы уже в форме гомогенного пламени горючей смеси, не требующего обязательного избыт-

Рис.317. Коэффициент дымообразования - величина оптической плотности выделяющегося дыма в расчете на единицу исходной массы образца по ГОСТ 12.1.044-89 при разных внешних тепловых нагрузках на тлеющую древесину [136].



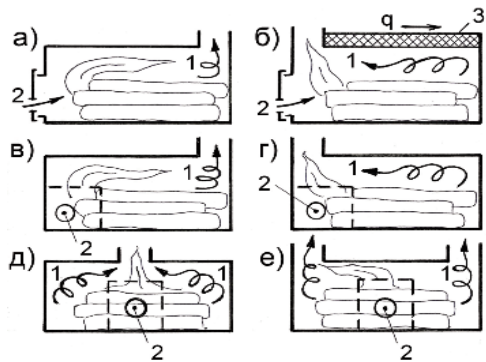


Рис.318. Распространение белого дыма в низких топливниках: а, б - длинный /глубокий/ узкий топливник, в, г, д, е - короткий /мелкий/ широкий топливник. 1 - белый дым, 2 - подача воздуха через отверстие в дверке топливника, 3 - массивный потолок.

ка кислорода /раздел 1.3.1/. А можно и просто окислить остатки горючих газов при высоких температурах в беспламенном режиме, например, типа FLOX® /рис.269/. Этот режим работает в средах, бедных кислородом, но требует высоких температур внутри колпака /хотя бы 800 - 900°C/, а главное, больших времен пребывания порядка секунд для окисления /в режиме без саморазогрева смеси/.

Наибольшие затруднения в горении всегда возникают в зоне кончиков пламени 5, где и горючие газы, и воздух сильно разбавлены дымовыми газами /рис.302/. Поэтому и температуры горения в верхушке низки. Низки и скорости реакций окисления. Вследствие этого, зону догорания верхушек пламен желательно либо теплоизолировать-разогреть /поскольку для пламени важен "каждый градус"/, либо продувать свежим воздухом.

В то же время, поддержанием кончика пламени при высокой температуре создаются условия, когда окисление уже возможно и без саморазогрева реагирующих газов, то есть в беспламенном режиме. По сути, процесс горения в верхушке пламени 5 /рис.302/ всегда /даже без колпака/ близок к режиму беспламенного горения FLOX® /рис.269/, поскольку происходит в среде горячего воздуха, сильно разбавленного продуктами сгорания.

Чаще всего, столь высоких температур /порядка 800°C и выше/ в колпаках топок печей не бывает, тем более, что пламена в условиях тяги трубы стремятся идти в хайло, нежели вверх в высокий тупик. Так, арочная русская печь обычно имеет температуру сводов не более 400°C, поэтому дожигания остатков горючих газов там ожидать не приходится.

5.9.1.8. Выделенные камеры дожигания

В развитие соображений о дожигании пламен под раскаленными сводами обозначим концепцию выделенных камер дожигания,

Камера дожигания пламен представляет собой отдельный узел - по конструктивной сути продолжение топливника /или некая часть топ-

ливника/. Это транзитная /проточная/ полость, соединенная с топливником широким проходным отверстием /"окном", проемом/, в которую свободно истекают пламена при их чрезмерном удлинении.

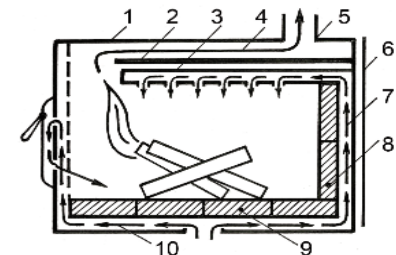
Камеры дожигания мыслимы /так же как и раскаленные своды/ в двух основных вариантах исполнения - камер дожигания пламен и камер дожигания горючих газов /в том числе погасших пламен/ в беспламенном режиме. Появление идеи камеры дожигания пламен обусловлено потребностью удлинения топливника при форсировании существующего топливника. Потребность в камере дожигания пламен может возникнуть не только при интенсификации горения дров, но и при стремлении повысить чистоту горения. При этом топливник превращается, в частности, в предтопку или в газогенераторную камеру /рис.259/.

Так, например, первые пароводогрейные котельные установки имели котел /водотрубный регистр/ непосредственно в топке /рис.310/. Теплоем в топке называется "прямой теплоотдачей". Прямая теплоотдача подразумевает наличие в топке так называемого "холодного ядра" /охлаждаемых участков среди раскаленных стенок/, что снижает лучистые потоки тепла на дрова и уменьшает скорости газификации древесины, то есть не позволяет древесине быстро гореть /быстро преобразовываться в горючие - летучие и угли/.

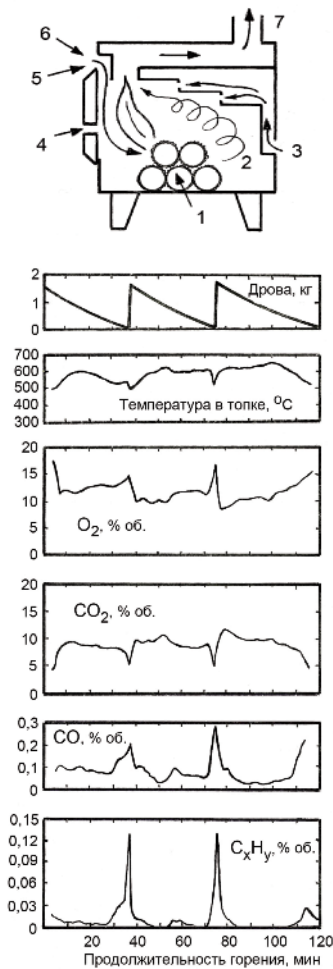
Напомним, что поглощение тепла дымовых газов является основной целевой функцией печей и котельных установок, в связи с чем факт наличия "холодного ядра" в топливнике может отрицательно сказываться лишь на сопутствующих факторах - на скорости газификации древесного топлива и на скорости выделения белого дыма.

В целях форсирования горения дров в топке стали монтировать теплоизлучающие "своды" 2 /рис.310/, а впоследствии котел /как холодное ядро/ вообще вынесли из топки или, что одно и то же, топку "вынесли" из камеры, где расположен котел, или к топке пристроили котельную камеру, где и расположили котел /рис.311/. Так или иначе, но тем самым образовались две камеры, причем все стенки в топочной камере стали горячими, что привело за счет повышения теплового излучения на дрова к усиленному выходу летучих и удлинению пламен, которые догорали в котельной камере, ставшей одновременно

Рис.319. Принципиальная схема малодымящей печи с уровнем дымления не более 7,5 г/час (www.era.gov): 1 - корпус печи, 2 - горизонтальный дымооборот, 3 - перфорированная труба для распределенного ввода вторичного воздуха, 4 - хайло, 6 - экранирование печи /кожух/, 7 - канал подогрева вторичного воздуха, 8 - огнеупорная футеровка /теплоизолирующая/, 9 - огнеупорный глухой под, 10 - канал подогрева первичного воздуха.



и камерой дожигания. Во всяком случае, так удается разделить процессы горения дров, требующие горячих стенок, и процессы сжигания пламен, не требующие обязательно горячих стенок. При этом учитывалось также, что доля прямой теплоотдачи /и в нагрев воды в котле, и в теплоаккумуляцию стенками/ уменьшается при увеличении расхода воздуха через топку. В дальнейшем, при переходе на форсированное сжигание пылеугольного топлива, в целях предупреждения разрушения огнеупорных стенок топки и предотвращения оплавления золы, в топку промышленных котельных установок вновь стали вводить “экраны” 3 в виде дополнительных водотрубных регистров /рис.312/.



Можно предположить, что топливники бытовых печей, имеющие “холодное ядро”, например, в виде водогрейных регистров /рис.313/, не требуют особых камер дожигания пламен, поскольку из-за малых тепловых нагрузок на дрова пламена не имеют большой высоты и могут догорать в топливнике. Но если топливник имеет раскаленные стенки, то пламена становятся настолько высокими, что камера дожигания в том или ином виде становится весьма желательной /рис.314/.

Камеры дожигания горючих газов отличаются тем, что пламена там отсутствуют /в отличие от камер дожигания пламен/, и окисление горючих газов ведется не при высоких температурах оболочек диффузионных пламен 1000-1700°C, а беспламенно при температуре камеры дожигания. Поэтому камеры дожигания горючих газов должны обязательно иметь раскаленные стенки /в отличие от камеры дожигания пламен/. Камеры дожигания горючих газов близки по своей сути к камерам дожига белых дымов /см. далее/.

Рис.320. Схема печи Jotul F3 /высота x ширина x глубина = 0,21 x 0,48 x 0,21 м/ и динамика горения при подкладках дров [155]: 1 - дрова, 2 - белый дым, 3 - вторичный воздух, 4 - воздух на розжиг, 5 - воздух на обдув стекла, 6 - воздух первичный, 7 - труба.

Конечно, такое подразделение камер дожигания может показаться надуманным, тем более с учетом обстоятельств, связанных с возможным осаждением смол и сажи на холодных поверхностях. Но здесь нам важно было обозначить основной физической смысл объекта - печные камеры дожига горючих газов используют длительное беспламенное доокисление и аналогичны высокотемпературным аппаратам очистки промышленных газовых выбросов от вредных органических примесей /например, в огневых каналах, в том числе с применением списанных авиационных турбореактивных двигателей, в раскаленных муфельных камерах, в каталитических реакторах и т.п./.

5.9.2. Дожигание жидкокапельных летучих

Жидкокапельные летучие представляют собой туманы смол и масел /дегтей/, образовавшихся при термолитизе древесины. Жидкокапельные летучие выделяются с поверхности нагреваемой древесины /в частности, из негорящих пока торцов воспламенившихся поленьев/, в виде белого дыма проходят мимо пламен, не воспламеняются и уходят в дымовую трубу /см. раздел 1.3.5/.

Чтобы сжечь белый дым, надо сначала его газифицировать - испарить капли горючих жидкостей и получить горючие пары. Здесь мыслимы два основных варианта - можно испарить белый дым тотчас при выходе из древесины, а можно испарить в объеме топливника.

5.9.2.1. Дожигание белого дыма у поверхности древесины

Испарение капель тумана тотчас при их выходе из древесины по сути является способом предотвращения распространения белого дыма в объеме топливника. При испарении белого дыма непосредственно у поверхности древесины образуются сплошные объемы горючих паров, распространяющиеся в виде потоков горючих газов, которые могут воспламениться в воздухе в форме обычных языков диффузионного пламени. Фактически, речь идет о том, что испаряя белый дым, можно объять пламенами все газовыделяющие поверхности дров.

Для испарения белого дыма надо нагреть его сразу же при выходе его из древесины. Это можно сделать либо облизыванием дымящих зон поленьев пламенами, горящими над соседними участками древесины, либо облучением лучистым теплом с горящих обугленных поленьев или с раскаленных стенок и перекрытий топливника. То есть надо организовать либо сплошной “зонтик огня” над дровами /рис.315-а/, либо накрыть все дрова сверху тепловым излучением /рис.315-в/ так, чтобы испарить разом все возможные потоки белого дыма (условно обозна-

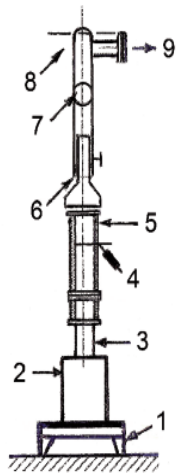


Рис.321. Схема испытания печи по евростандарту EN 13240: 1 - весы, 2 - испытываемая печь, 3 - труба, 4 - пробоотбор дымовых газов, 5 - измерительный тракт, 6 - регулятор тяги в печи, 7 - канал разбавления, 8 - вентилятор /дымосос/, 9 - в дымовую трубу.

ченные “завитушечными” линиями) прямо при выходе из древесины /рис.315-б/. Ясно, что узкие высокие топливники /шахтные/ более пригодны для организации сплошного зонтика огня, особенно при розжиге сверху /рис.316-а/, а широкие низкие топливники - для организации теплового облучения дров сверху /рис.316-б/.

Напомним, что при облучении древесины тепловыми потоками мощностью выше 14 кВт/м^2 /то есть тепловыми излучениями с поверхностей с температурой свыше 440°C / возможно не просто испарение белого дыма, но и воспламенение паров, а при облучении мощностью свыше 20 кВт/м^2 возможно и их самовоспламенение /см. разделы 1.2.1 и 5.8.4/. Действительно, пик дымления тлеющей древесины приходится как раз на мощность внешнего теплового облучения порядка 20 кВт/м^2 , поскольку при более высоких мощностях возникает пламя, сжигающее образовавшиеся пары смол и масел /рис.317/.

Сплошное пламя над дровами, играющее роль “огневого зонтика”, состоит комбинированно из “первичных” /основополагающих/ пламен, гревших /прямо или косвенно/ белый дым первоначально, и “вторичных” пламен, образовавшихся в результате нагрева и испарения белого дыма “первичными” пламенами. Разобрать значимость роли каждого языка пламени порой невозможно. Важно лишь учитывать, что сплошной “огневой зонтик” не может возникнуть при горении одиночного полена - нужна куча поленьев, где в результате коллективного взаимодействия пламен испаряются все капли тумана и тотчас дожигаются.

Вместе с тем, в случае низких /”сплюснутых”, ”распластанных”/ подовых топливников с низкими закладками дров основополагающая роль “первичных” пламен может оказаться недостаточной. Дело в том, что в случае длинных поленьев “первичные” пламена могут находиться настолько далеко от холодных дымящихся торцов поленьев, что ни испарить, ни поджечь выделяющийся белый дым не могут /рис.318/. Не могут зачастую “первичные” пламена и прогреть /раскалить/ потолки над дымящимися торцами поленьев, поскольку тепловой поток по перекрытию q бывает недостаточным для сильного равномерного прогрева всего перекрытия /рис.318-б/. Так что “сплюснутые” подовые топ-

ливники могут иметь длительные белые дымления при растопке /пока не прогреется все перекрытие/. Тем не менее, из-за красоты “развернуто” горящих пламен, “сплюснутые” топливники широко используются в комнатных печах с застекленными дверцами топки.

5.9.2.2. Дожигание белого дыма в объеме топливника

Белый дым, не загоревшийся сразу же над древесиной, приходится дожигать в объеме топливника. Удачным вариантом при этом является расположение хайла над зоной преимущественного горения древесины /рис.318-б,г,д/, поскольку белый дым при этом неминуемо проходит рядом с существующими пламенами и при достаточно высоких пламенах может испаряться и догорать при тепловом контакте с ними.

Белый дым /туман капель масел и смол в газообразных продуктах термолитиза дров/, вышедший в объем топливника, отличается тем, что он уже смешался с воздухом. Тогда при испарении капель жидкостей образуются не сплошные объемы горючих паров в воздухе, а молекулярные смеси горючих паров с воздухом, способные гореть не гетерогенно языками пламени, а гомогенно в виде всполохов пламени /см. раздел 1.3/.

Испарение белого дыма в объеме топливника обеспечивается нагревом пламенами /рис. 252 / и тепловым илучением /рис.256, рис.259/. К особым методам испарения относится нагрев белого дыма подогретым вторичным воздухом /рис.246-в/. Идея этого способа /для дожигания именно дыма/ зародилась, видимо, в металлических печах длительно-го горения, использующих режим тления дров в топливнике. Такие отопительные печи тления /”газогенерирующие” печи/ по-существу являют-

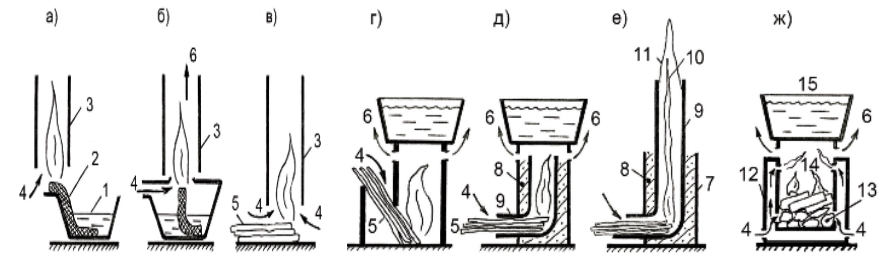


Рис.322. Ракетные печи /см. текст/: 1 - емкость с маслом лампадным /оливковым/, 2 - фитиль хлопчатобумажный плетеный, 3 - трубка стеклянная /плафон/, 4 - подсос воздуха, 5 - древесный хворост /ветки, лучина/, 6 - выход дымовых газов, 7 - кожух /бочка, банка, бидон/, 8 - утеплитель термостойкий /зола/, 9 - трубчатый топливник, выполняющий также и роль дымовой трубы, 10 - язык пламени, 11 - огненное окружение пламени, 12 - полый корпус, 13 - угли древесные, 14 - пламена воздуха в дымовых газах, 15 - посуда.

ся генераторами белого дыма - аэрозвеси микрокапель дегтя, пригодного, в частности, для использования в качестве антисептика /фенола/ для копчения мясных и рыбных продуктов. Но в отопительных печах белый дым, образующийся в большом количестве, желательнее было сжигать /по экологическим соображениям, а также в целях снижения конденсатообразования в дымовых трубах, а также для повышения КПД печей/. Для этого топливник утепляли /чтобы он смог нагреться даже от тепла тления и испарить белый дым/, а вторичный воздух подогревали /к сожалению, как правило, не за счет тепла отходящих дымовых газов, поскольку они и так холодные, а вынужденно за счет тепла, отбираемого из топки/. В таких печах действительно наблюдались диффузионные пламена вторичного воздуха в загазованном воздухе топливника /как в горючем газе/, однако эти пламена были не устойчивы и затухали при снижении скорости газификации дров в топке. В результате, такие печи так и не смогли обеспечить надежный дожиг белого дыма в режиме тления дров /вопреки коммерческой рекламе/, но в пламенном режиме давали сниженный уровень дымления и были сертифицированы экологическими органами США /рис.319/.

Приведем для примера результаты испытаний чугунной печи Jotul-F3 /Норвегия/ системы "чистого горения" /рис.320/. Согласно требованиям стандарта DIN EN 13240 в испытываемой печи с первого же момента розжига поддерживалось постоянное разрежение 12 Па /тяга/ специальным вентилятором 8, что существенно отличает такие евроиспытания от реальной практики, когда холодная печь стартует с нулевой тягой /из-за исходно холодной дымовой трубы/. Видно, что при подкладках дров в горячую печь, температура в печи на короткое время падает за счет охлаждающего воздействия холодных дров. При этом концентрация кислорода повышается (а концентрация двуокиси углерода соответственно снижается, поскольку сохраняется соотношение концентраций $O_2 + CO_2 = 21\%$ об.), что указывает на приостановку процессов пла-

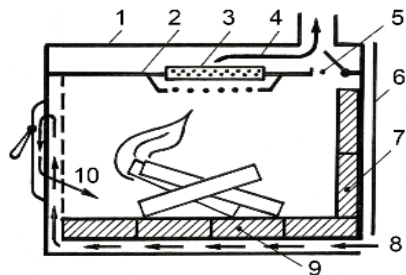
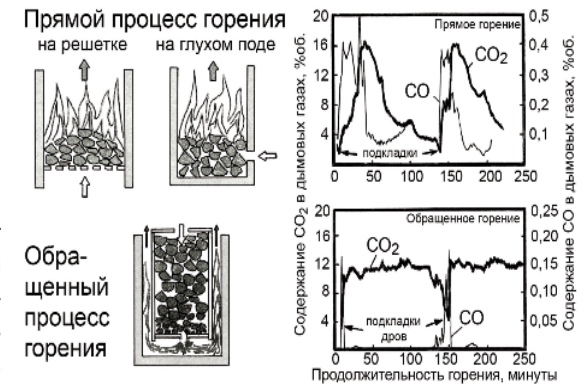


Рис.323. Экологически чистая (сертифицированная в США с уровнем дымления не более 4,1 г/час) металлическая печь с каталитическим дожиганием горючих газов: 1 - корпус, 2 - перегородка, 3 - катализатор сотовый, 4 - выход дымовых газов, 5 - задвижка обходного/байпасного/канала, 6 - кожух печи /экран/, 7 - футеровка, 8 - канал подогрева воздуха, 9 - глухой под, 10 - система охлаждения дверцы.

Рис.324. Динамика выделения окиси и двуокиси углерода в воздушную атмосферу в составе дымовых газов из дровяных печей с разными принципами сжигания дров [157].



менного горения. В этот момент наблюдается пиковый выход из нагреваемых дров продуктов пиролиза (разного рода углеводородов C_xH_y) и продуктов неполного сгорания (окиси углерода CO), которые затем вспыхивают, сгорают пламенами и больше в составе дымовых газов не регистрируются. Установить, чем обусловлено воспламенение CO и C_xH_y (то ли повышением их концентрации, то ли разогревом за счет повышенной температуры вторичного воздуха) невозможно.

Даже в активном пламенном режиме /"номинальном"/, наряду с выходом CO и C_xH_y , возможен выход через дымовую трубу аэрозолей жидких частиц дегтей /белого дыма/ и аэрозолей твердых сажистых частиц /черного дыма/. Действительно, методами фильтрации дымовых газов /из пробоотборника в трубе 4/ было замерено "сажевое число" - среднее содержание частиц в горячих дымовых газах 10,9 мг/МДж (миллиграмм на мегаджоуль выделившейся при горении тепловой мощности). Содержание же окиси углерода составило 643 мг/МДж. Это очень низкие цифры, даже учитывая, что в топливнике происходил активный пламенный процесс горения дров. Тем не менее, содержание частиц в охлажденных дымовых газах в канале разбавления 7 оказалось равным 108 мг/МДж [155]. Десятикратное увеличение содержания частиц объяснялось объемной конденсацией паров дегтей в ультрадисперсный масляный туман-аэрозоль /в сизый дым по терминологии раздела 1.3.5/. Таким образом, испарение белых дымов в топливнике не гарантирует их полного сгорания даже в случае пламенного горения специально сконструированных печей /см. далее раздел 5.10/.

5.9.3. Ракетные печи

Вышеприведенные соображения по дожиганию летучих могут быть проиллюстрированы, в частности, на примере так называемых "ракет-

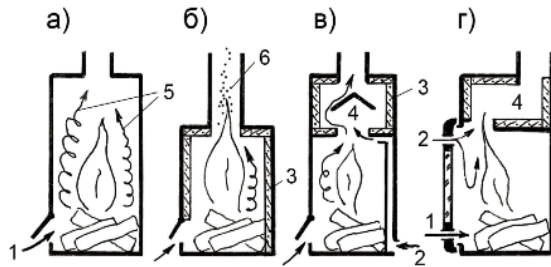


Рис.325. Принципиальные схемы топливников дровяных печей, поясняющие физическую суть способов снижения дымообразования при горении дров /см. текст/.

ных печей” /Rocket Stoves/, использующих

древний принцип астральных /”звездно-белого” света/ осветительных лампад на масле, обладающих очень высокой степенью дожигания углеводородного топлива. Первоначально масляные лампады /в том числе и ритуальные церковные/ представляли собой плошку с маслом 1, в которую погружали фитиль 2 /рис.322-а/. Такая лампада горела обыкновенно тускло желтым светом и сильно коптила “чадом” /сизым дымом/. Однако, если пламя погружалось в вертикальную стеклянную трубку 3, то пламя переставало загрязнять стекло, не коптило и становилось белым /рис.322-а/. Разработанные на этом принципе осветительные масляные лампы /Aime Argand, 1780/ стали использоваться даже на морских маяках /рис.322-б/ и стали предшественниками керосиновых осветительных ламп /рис.326/.

Принцип интенсификации горения за счет спутного принудительного обдува может быть использован и при сжигании древесины в кострах /рис.322-в/. Дело в том, что подсос воздуха 4 тягой трубы способен за счет “облизывания” и воздушного “обжатия” пламени увеличивать поступление кислорода в оболочку пламени, что способствует повышению температуры горения в оболочке пламени /хотя и сокращает температуру отходящих дымовых газов по аналогии с рис.87-б/.

Собственно, для печей с трубной тягой как раз и характерна такая ситуация, когда при полностью раскрытых воздушных задвижках топливника пламя от дров является горячим, то есть по цвету белым /но дымовые газы при этом относительно холодные из-за разбавления избыточным воздухом/, а при закрытии задвижек пламя охлаждается, то есть становится по

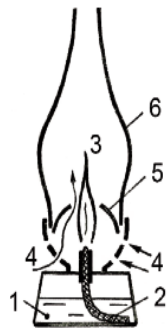
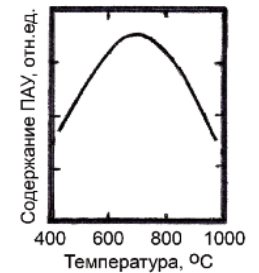


Рис.326. Устройство бытовой осветительной керосиновой лампы: 1 - керосин в баке, 2 - фитиль хлопчатобумажный плетёный, 3 - пламя светящееся, 4 - подача воздуха на горение, 5 - заужение /концентратор воздуха/, 6 - ламповое стекло /плафон, колба/.

Рис.327. Выход полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в зависимости от температуры в топке [155]. При температурах выше 700°C ПАУ начинают окисляться.



цвету желтым, а то и оранжевым /но дымовые газы при этом становятся горячее/.

Устройства, подобные осветительным керосиновым лампам, можно использовать и для приготовления пищи в посуде над открытым огнем в форме широкоизвестных кухонных “керосинок”.

На принципе осветительных лампад работают и кухонные “ракетные печи”, но не на масле или керосине, а на древесном топливе. Ракетные печи постепенно приходят на смену кухонным открытым очагам /миникострам/ в жилых помещениях жарких развивающихся стран Азии и Африки /Larri Winiarski, 1980/. Считается, что ракетные печи имеют меньшее дымление, чем открытые очаги. Ракетные печи используют непрерывную ручную подачу в топливник древесного топлива в виде хвороста 5 /сухих веток/ или лучины /сухих мелкоколотых поленьев/, а также непрерывную подачу воздуха 4 за счет тяги дымовой трубы /рис.322-г/. Ракетные печи имеют простейший топливник, не относящийся, строго говоря, ни к подовому, ни к решетчатому /колосниковому/ типу, а являющийся камерой сгорания с непрерывно подаваемым горючим, как и в случае топливников на пеллетах /древесных таблетках/.

Для дожигания пламен используется достаточно большой расход воздуха, а в целях сжигания белых дымов выбираются малые поперечные размеры топливника так, чтобы выделяющийся белый дым тут же испарялся бы и окислялся при контакте с пламенем, тесно заполняющим топливник /и трубу тоже/. Для предотвращения выхода дыма через открытое загрузочное отверстие /для подачи хвороста/, приток воздуха за счет тяги трубы организовывается именно через это отверстие.

Топливник /камера сгорания/ и дымовая труба часто выполняются из единой изогнутой герметичной металлической трубы 9 небольшого диаметра /100-150 мм/, причем труба утепляется термостойкими теплоизолирующими материалами 8 /рис.322-д/. За счет повышенной температуры стенок топливника достигается испарение белого дыма /непосредственно при выходе из древесины/, а также и сжигание полученных горючих паров в горячей трубе, заполненной диффузионным пламенем. Горячие стенки топливника обеспечивают также высокую скорость газификации топлива и высокую мощность горения ракетной печи /до 10 кВт/, способной вскипятить литр вода за считанные минуты.

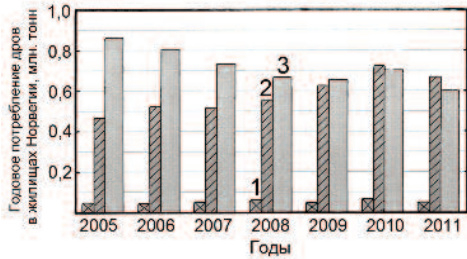


Рис.328. Динамика потребления дров в жилищах на примере Норвегии: 1 - открытые очаги /камины/, 2 - печи /и огражденные очаги/ старых конструкций, 3 - печи новых конструкций [156].

Отметим, что ракетные печи способны в принципе поддерживать устойчивое горение длинных /вытянутых "кишкой"/ пламен в высоких дымовых трубах /высотой до нескольких метров/ с практически бездымным порой догоранием пламени над срезом трубы, что полезно для ряда применений. При этом в дымовой трубе отчетливо различается центральное /приосевое/ горячее желтое ядро диффузионного пламени 10 и более холодное оранжевое "огненно-воздушное" внешнее окружение 11, содержащее горящие частицы дыма, образовавшиеся при беспламенном нагреве и термодеструкции паров дегтей /рис.322-е/.

Помимо ракетных печей в последние годы зарубежом активно развиваются /с государственной поддержкой в развивающихся странах/ кухонные "печи газификации" /Gasifying Stoves/, также называемые "печами дровяного газа" /WoodGas Stoves/, "печами биологического газа" /BioGas Stoves/ или "дымосжигающими печами" /Smoke Burner Stoves/ системы "верхнего розжига с прямой тягой" TLUD /Top lit Updraft/ с принудительным дутьем от электровентилятора /Forced-Air/ или на естественной тяге /Natural Draft/. Как и кухонные ракетные печи, "печи газификации" эксплуатируются в помещении без применения дымовой трубы, поскольку эти печи, как заявляется, "сжигают дым" /рис.322-ж/.

Печь "газификации" /газогенерации/ представляет собой "стакан" с двойными металлическими стенками 12 /рис.322-ж/. Наружный стакан является теплоизолирующим и газораспределяющим кожухом. Внутренний "топочный" стакан является подовой /а в ряде случаев и решетчатой/ камерой газификации /точнее, газогенерации, по принципу, близкому к рис.319 и 320/, в которую загружают топливо в виде деревянных чурок или брикетов биотоплива /то есть из растительного сырья/ с характерным размером порядка 5x2x1см /рис.322-ж/. Первичный розжиг закладки топлива осуществляется, как правило, сверху с последующими дозагрузками топлива на горящие угли 13. Воздух на горение 4 подается в кожух 12 и затем, подогревшись, поступает в "топочный" стакан, перераспределяясь на первичный /через перфорации в придонной части топочного стакана/ и на вторичный /через перфорации в

верхней части топочного стакана/. Из-за предусмотренной нехватки первичного воздуха (с коэффициентом избытка воздуха порядка 0,3 - 0,4 при влажности дров 10-12%), из закладки дров наряду с языками пламени вырываются и недогоревшие газообразные углеводороды, в которых и горят пламенами языки воздуха 14. Как и в обычных печах, наряду с газообразными летучими, из топливника могут вырываться и дымы - белые туманы дегтей от тлеющей древесины и черные аэрозоли твердых частиц углерода /сажи/ от недогоревших кончиков пламен.

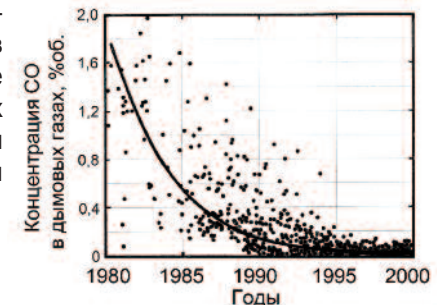
Несмотря на заявляемые потребительские достоинства вышеуказанных печей, замеры показывают наличие вредных выбросов [159]:

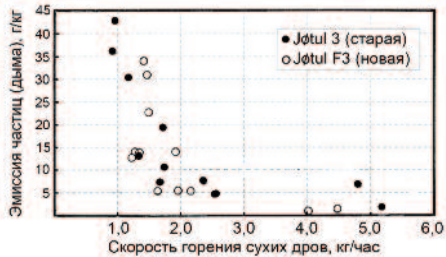
	Тренога над костром	Ракетная печь	Печь газификации
Пламенный режим			
Затраты тепловой энергии дров на нагрев воды до кипения, кДж/литр			
	6553	2470	3721
Эмиссия в помещение:			
- окись углерода, %об.	3,80	1,67	3,01
- углеводороды газ, %об.	0,35	0,33	0,94
- углеводороды туман /белый дым/, г/кг	1,45	0,55	0,82
- сажа /черный дым/, г/кг	0,88	1,16	0,28
Тлеющий режим			
Эмиссия в помещение:			
- окись углерода, %об.	11,8	3,2	4,7
- углеводороды газ, %об.	0,47	0,27	0,96

5.9.4. Каталитическое окисление горючих газов

Известна возможность сорбционного беспламенного окисления остаточных количеств углеводородов в дымовых газах (в том числе и в виде дымов-конденсатов) на нагретых поверхностях. Дело в том, что при наличии раздела фаз появляется

Рис.329. Динамика снижения выбросов окиси углерода CO в атмосферу с дымовыми газами дровяных печей в Австрии [157].





возможность физической (в форме “прилипания”) или химической (в форме образования

радикалов, неустойчивых химических соединений) адсорбции (внешней сорбции) или абсорбции (внутренней сорбции), в том числе и селективной, молекул углеводородов на твердой поверхности из газовой фазы. При этом может достигаться длительный контакт сорбированных /то есть удерживаемых поверхностью/ молекул углеводородов с кислородом в дымовых газах, что способствует их окислению внутри топливника. Не углубляясь в химию подобных процессов, укажем лишь, что физически сорбироваться /осаждаться/ могут и частицы сажи, а потом при достаточности температуры могут долго гореть /вернее, окисляться, поскольку самопроизвольного повышения температуры практически не происходит/ в остаточных количествах кислорода в дымовых газах.

Твердые поверхности по отношению к сорбированным веществам могут проявлять и химическую активность, как правило, селективную /избирательную - выборочную по отношению к отдельным химическим соединениям/. Так, окислы металлов /ванадия, марганца, железа, кобальта, никеля, молибдена/ способствуют окислению сорбированных углеводородов. На платине, палладии и родии дожигается окись углерода. На окиси меди может дожигаться сажа.

При этом сама твердая поверхность в ходе химической реакции может и не потребляться /химически не преобразовываться и не расходоваться/. В таком случае поверхность называется каталитической. Ясно, что каталитической активностью может обладать не сама по себе поверхность, а отдельные компоненты этой поверхности, называемые каталитическими агентами /добавками/. Так, в частности, в химической технологии на термостойкий пассивный носитель, например, цеолит, наносят /осаждают, спекают, напыляют/ специальную активирующую добавку, которая и выполняет роль катализатора.

В печной технологии в одно время считалось, что шамотный огнеупор /спеченная глина/ может иметь каталитические свойства по отношению к окислению. Это привело, в частности, к тому, что шамотные решетки в верхней части топливников стали иногда назы-

ваться каталитическими /рис. 258, 300/. Однако, детальные исследования показали, что “обычный” шамот обладает крайне слабыми каталитическими возможностями, и при максимально приемлемых температурах окисляет /в дробленном виде в реакционной кварцевой трубке/ водород и окись углерода за времена, исчисляемые минутами [160, 161]:

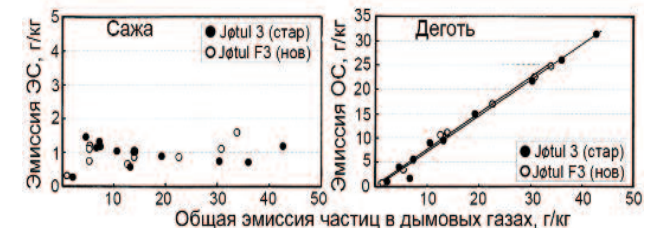
Степень окисления (%)	Температура, °С	Время, мин	Кварц	Шамот	Дунит
Водород H ₂	500	5	1%	3%	75%
Окись углерода CO	500	5	2%	5%	99%
Окись углерода CO	1000	5	5%	45%	100%
Окись углерода CO	1000	30	12%	90%	100%

Дунит - натуральный огнеупор /горная порода/, состоящий в основном из окислов кремния и магния, в отличие от шамота, состоящего в основном из окислов кремния и алюминия. Дунит использован в исследованиях исключительно как объект сравнения и подтверждения работоспособности методики измерений. Таким образом, шамот /без введения активирующих добавок/ не проявляет достаточных каталитических свойств.

Тем не менее, в работах [17, 161] сообщалось, что шамотные решетки /рис.300/ обеспечивают в дровяной топке существенное снижение концентрации окиси углерода в дымовых газах при температурах решетки 600 - 840°С. Это может являться следствием не каталитического или смесительного влияния, а последствием развития пламен над дровами под действием лучистого тепла, испускаемого раскаленной решеткой /рис.258-а/.

В России каталитические бытовые печи пока не актуальны /хотя в стране производятся катализаторы для “беспламенного дожигания” окиси углерода и углеводородов в дымовых газах/. В США же серийно выпускаются экологически чистые каталитические отопительные печи /рис.323/. Металлоокисный каталитический пакет 3 в виде фильтрующей решетки устанавливается в верхней части топливника, чаще всего подового. Печь разжигается при открытом канале прямого хода 5. После предварительного прогрева каталитического пакета 3 и дымовой трубы, задвижку 5 закрывают, и каталитический пакет поддерживается постоянно при рабочей температуре 180-400°С за счет тепла дымовых газов.

Рис.331. Содержание элементарного углерода ЕС /сажи/ и органического углерода ОС /углеводородов-дегтей/ в дымах дровяных печей старых и новых конструкций [156].



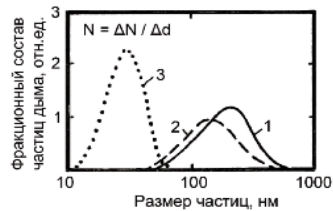


Рис.332. Распределение размеров частиц дыма в дровяных печах /в пересчете на нормируемую концентрацию кислорода 13% в дымовых газах/: 1 - на стадии розжига печи, 2 - на стадии основного горения, 3 - на стадии догорания дров [158].

Для процесса каталитического окисления большие избытки воздуха не требуются.

5.10. Эмиссия печей

Эксплуатация дровяных печей сопровождается выделением /эмиссией/ в атмосферу загрязняющих примесей. Продукты полного сгорания древесины CO_2 и H_2O влияют на свойства атмосферы, но не относятся к токсичным веществам. Продукты неполного сгорания древесины /углеводороды в виде газов и белого дыма, окись углерода, сажа в виде черного дыма/ могут представлять угрозу для здоровья людей.

В разделе 5.9 при анализе вопросов дожигания пламен и дымов по- существу рассматривались способы предотвращения эмиссии продуктов неполного сгорания, выделяющихся в основном при розжиге печи, а также при подкладках дров и при обрушениях горящих поленьев /рис.324/. Для снижения эмиссии CO и дымов рекомендуется [157]:

- для испарения и дожигания белых дымов 5 /рис.325-а/ топливник "утеплять", то есть быстро нагревать и поддерживать при высокой температуре выше 500°C /рис.325-б/,
- для предотвращения черного дыма 6 обеспечивать достаточный объем /высоту/ топливника /достаточные времена пребывания горючих газов/,
- для предотвращения перехода пламенного горения в тление, а также для дожигания окиси углерода и черного дыма 6 в "зонтиках огня", обеспечивать коэффициент избытка воздуха в топке не менее 1,3-1,7, а в закладке дров не более 0,2-0,4, причем воздух 1 и 2 распределять во все зоны горения пламен /рис.325-г/, то есть обеспечивать хороший контакт воздуха с пламенами, например, с помощью заужений 5 /рис.326/,
- для доокисления окиси углерода и газообразных углеводородов поддерживать при температуре выше 800°C /рис.327/ камеру дожигания 4 /рис.325-в, рис.325-г/.

Мировое потребление дров /и возобновляемого биотоплива вообще/ остается весьма значительным. Так, в США на протяжении уже 180 лет выработка бытовой тепловой энергии за счет дров сохраняется практически на неизменном уровне, хотя доля этого "дровяного тепла" в энергопотреблении США за это время снизилась со 100% до 3%. Даже в Норвегии, добывающей огромные количества природного газа, в год

потребляется около 1,4 млн. тонн дров /рис.328/ и при этом выбрасывается в атмосферу около 50 тыс. тонн жидких и твердых загрязняющих веществ /дымов/ ежегодно, что может влиять на экологию Арктики.

В Европе традиционно в первую очередь контролировались выбросы окиси углерода, причем ужесточение экологических требований к котлам и печам шло в соответствии с повышением чистоты выхлопа автомобилей /рис.329/. Если российский ГОСТ 9817 до сих пор допускает содержание окиси углерода в отходящих газах бытовых теплогенераторов до 4% об., то евростандарт EN 13240 ограничивает концентрацию окиси углерода в дымовых газах дровяных печей на уровне 1% для класса 2 и на уровне 0,3% для класса 1. Стандарты же Германии DIN EN 13240 и DIN EN 15250 предусматривают еще более низкий уровень 0,2% и планируют на перспективу ужесточение до уровня 0,125%.

В США /и в Канаде/ традиционно в первую очередь контролировалось дымление печей с допустимой нормой по сажевому числу 7,5 г/час с ужесточением до 4 г/час. В других странах допустимые нормы дымления устанавливались в разных единицах измерения: 4 г/кг дров в международном стандарте ISO 13336 и новозеландском NZ 4013, 5,5 г/кг в английском BS 7256, 40 мг/МДж в шведском SP 1425 /по состоянию на 2000 г./, 3,3 г/кг в австралийском стандарте AS 4013. В Германии в 2010 году введены стандарты DIN EN 13240 и DIN EN 15250 с нормированной эмиссией "пыли" 75 мг/м³ с перспективным ужесточением до 40 мг/м³.

Единицы измерения могут быть сопоставлены между собой лишь условно при известных режимах работы печей и при известных составах дымов. Так, при отсутствии пепла, при коэффициенте избытка воздуха, равном трем, при теплотворной способности дров 2400 ккал/кг, при расходе дров 1 кг/час уровень дымления 4 г/кг соответствует ориентировочно 400 мг/МДж или 400 мг/м³ или 4 г/час. Дожигание дымов дает заметный вклад (более 1%) в тепловой баланс печи лишь при уровнях дымления более 10 г/кг /то есть более 10 г жидких и твердых частиц дыма на 1 кг дров/.

Наиболее детально вопросы нормирования дымления печей проработаны, видимо, в норвежских стандартах NS 3058 и NS 3059. Так, в отличие от немецких стандартов DIN EN 13240

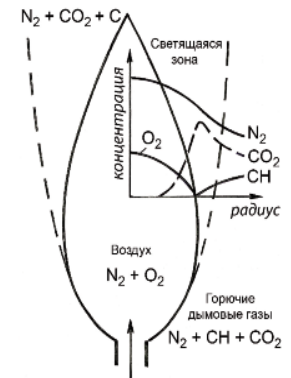


Рис.333. Внутренняя структура диффузионного пламени воздуха в горючих загазованных дымовых газах.

и DIN EN 15250 учтено, что характер дымления существенно изменяется при изменении скорости горения дров и что при охлаждении дымовых газов в атмосфере возможно появление добавочных частиц дыма, обусловленных объемной конденсацией паров дегтей [156].

Действительно, при малых скоростях горения печи /"нормальный" режим, отопительный, ночной/ преобладают процессы тления дров с выходом большого количества белого и сизого дыма до 40-100 г/кг, что соответствует до 10% недожега дров /рис.330/. При повышенных скоростях горения печи /"средний" режим, дневной/ выделение дыма снижается до 5-10 г/кг. А при больших скоростях горения печи /"номинальный" режим, протопочный/ выделение дыма сокращается до 1-5 г/кг. При этом оказалось, что при "нормальном" режиме горения /тлеющем/ дым практически полностью состоит из жидких частиц дегтей /рис.331/. Поэтому норвежские стандарты предусматривают замеры содержания частиц дыма в четырех диапазонах скоростей горения печи (менее 0,8 кг/час, 0,8-1,25 кг/час, 1,26-1,90 кг/час и более 1,9 кг/час). Среднее значение замеров не должно превышать предельную нормируемую величину 10г/кг /максимально допустимое сажевое число/.

Все эти цифры соответствуют норвежским замерам в камере разбавления при температуре фильтра не более 30°C /рис.321/, а не в дымовой трубе, как это принято в немецких стандартах при температуре фильтра 70°C /см раздел 5.9.2.2/. В результате, норвежский уровень дымления 10 г/кг соответствует примерно немецкому уровню дымления 1 г/кг /который контролируется, кстати, только при "номинальном" режиме горения/.

Отметим, что печи нового поколения "чистого горения" с горячим вторичным воздухом Jotul-F3 /рис.320/ не обеспечивают устойчивого снижения дымления при малых скоростях горения /в тлеющих "ночных" режимах/ по сравнению с печами старого поколения Jotul-3 без наличия вторичного воздуха вообще /рис. 330/.

В последние годы началось изучение наночастиц в выбросах дровяных печей /рис.332/.

5.11. Пламена воздуха в горячем газе

При вводе "дожигающего" вторичного воздуха в загазованный воздух топливника могут возникать необычные пламена "воздуха в горячем газе" 14 /рис.322/. Имеется в виду, что внутри оболочки пламени находится воздух, а снаружи располагается горячий газ.

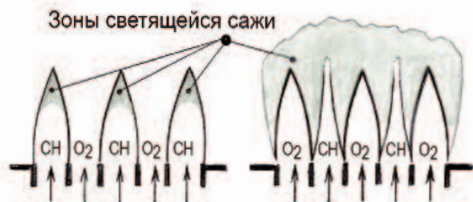
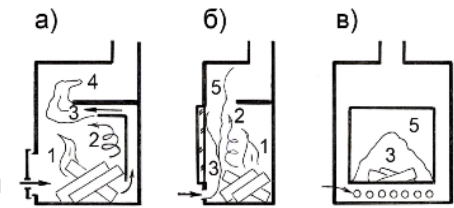


Рис.334. Светящаяся зона горячей сажи внутри пламени углеводородного газа CH в воздухе /слева/ и над пламенем воздуха в горячем углеводородном газе CH /справа/.

Рис.335. Пламена вторичного воздуха : 1 - тлеющая древесина, 2 - горючие газы /дымы, пары/, 3 - воздушная внутренность пламен, 4 - пламена ВВ в горячем газе, 5 - светящаяся зона горячей сажи.



Вообще говоря, для горения предварительно неперемешанных газов форма разделительной поверхности не существенна /рис.38/. Важно учитывать лишь, что на горячей границе раздела горячего газа и воздуха /в оболочке пламени/ образуется слой продуктов сгорания, через который вынуждены диффундировать молекулы горячего газа и кислорода /рис.39, 40, 302/. Так что и рассматриваемые необычные /"вывороченные"/ пламена имеют те же особенности, что и обычные пламена /рис.333/. Так, в частности, чтобы интенсифицировать процесс горения "вывороченного" пламени, надо турбулизовать /"перемешивать"/ именно окружающий горячий газ /по аналогии с рис.302/.

Непривычной особенностью таких "вывороченных" пламен является наличие светящейся зоны горячей раскаленной сажи не внутри оболочки пламени, а снаружи /рис.334/. Эта светящаяся зона вздымается вверх "завесой огня" над оболочкой пламени. Внутри же оболочки находится темная несветящаяся зона воздуха. Наиболее наглядно это выражено в топливниках с подачей вторичного воздуха в задымленный топливник снизу вверх вдоль стекла дверки топливника /рис.325/. Воздушная зона 3 видна в стекле как темная область под зоной огня 5.

Как и в случае обычных диффузионных пламен /газ внутри, воздух снаружи/, в "вывороченном" диффузионном пламени /газ снаружи, воздух внутри/ концентрация наружного газового реагента должна сохраняться высокой на всем протяжении пламени. Это означает, что в "вывороченных" пламенах коэффициент избытка воздуха должен быть меньше единицы. Для дожига сажи требуется, наоборот, избыток воздуха. К счастью, обычно над всеми этими "вывороченными" пламенами располагается воздух атмосферы, где все остатки горючих компонентов догорают обычным пламенем.

В реальной же практике горячий газ /а фактически задымленный воздух/ разбавлен, в том числе и свободным кислородом. Такое неожиданное обстоятельство дает основание полагать, что подобные пламенные явления являются промежуточными между гетерогенными /диффузионными/ и гомогенными /кинетическими/ пламенами. Такие пламенные явления изучены пока недостаточно.