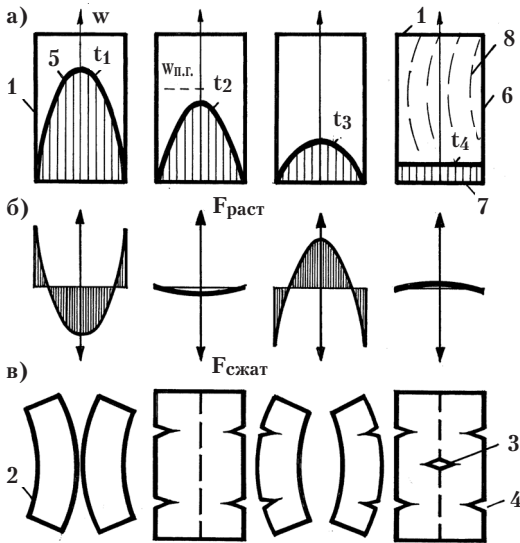


Рис. 86. Явления коробления и растрескивания при свободной сушке древесины: а – растрескивание бревна из-за усушки внешнего слоя (1 – кора, 2 – высыхающий, сжимающийся и растрескивающийся слой, 3 – трещина радиальная, 4 – искусственный пропил для фиксации трещины, 5 – трещина в виде расширения пропила, 6 – годовичные слои), б – укладка брёвен в срубе трещинами вниз, в – коробление досок, вырезанных в разных зонах бревна (вид с торца бревна), г – радиальная (1) и обычная тангенциальная (2) распиловка бревна на доски, имеющие широкую поверхность – пласт (3) и узкую кромку (4).

Под действием силовых нагрузок древесина способна не только упруго деформироваться и трескаться, но также и пластично деформироваться («течь», «плыть» растягиваясь или сжимаясь и сохраняя по-

том новую форму) и тем самым снимать внутренние механические нагрузки. Всем известно, что при заколачивании гвоздя древесина «раздвигается» и при этом как упругая резина «зажимает» гвоздь, а затем по прошествии времени гвоздь порой может быть легко извлечён из древесины даже рукой. Иными словами, древесина сначала ведёт себя как обычная резина – при сжатии сжимается, готовая тотчас упруго вернуться в прежнее несжатое состояние. Но потом, оставаясь в сжатом состоянии, она постепенно теряет упругие свойства, принимает новую форму и размеры (как жевательная резинка или пластилин) и при снятии нагрузки в прежнюю форму и размеры не возвращается. Это объясняется тем, что микрофибриллы в стенках клеток (трахеид) под действием механической нагрузки сжимаются и смещаются, сдавливая имеющуюся между ними влагу. Затем под действием сжатия влага из зазоров между микрофибриллами постепенно перетекает в другие зоны древесины или испаряется. Микрофибрилла «расслабляется», теряет упругие свойства, сохраняет новую форму даже без нагрузки. При последующем распаривании влага может вновь впитаться в зазоры между микрофибриллами, вследствие чего древесина разбухнет и вновь может приобрести упругие свойства (зажав, например, гвоздь или расперев доски бочки). Но если древесина высушена в какой-то фиксированной форме, например, в виде дуги (обруча) или «пропеллера», то она будет эту форму сохранять до распаривания и нового гнутья. Сжатие древесины при сушке называется усушкой, а противоположный эффект расширения при увлажнении – набуханием.



внешние трещины, идущие вдоль доски, 5 – графики относительной влажности древесины w внутри доски, 6 – пласт доски, 7 – кромка доски, 8 – концентрические годичные слои древесины (иллюстративно).

Рис. 87. Возникновение короблений и растрескиваний при сушке зажатой доски: а – распределение относительной влажности древесины по толщине доски в ходе сушки в последовательные моменты времени t_1 , t_2 , t_3 и t_4 . б – эпюры упругих напряжений, возникающих при сушке и снимающихся пластической деформацией, в терминах сил растяжения $F_{\text{раст}}$ в зонах сушки и сил сжатия $F_{\text{сжат}}$ в зонах, где сушка ещё не началась или уже закончилась, в – вид половинок доски, полученных раскалыванием образца в последовательные моменты времени, 1 – вид доски с торца (вдоль волокон), 2 – деформированные половинки доски, 3 – внутренние трещины, 4 –

Рассмотрим очень важный в практическом отношении вопрос коробления и растрескивания пиломатериалов. Для конкретности возьмём дощечку, выпиленную из свежесрубленной древесины, имеющую с торца вид прямоугольника 1 (рис. 87). Сушка ведётся потоками горячего воздуха или инфракрасного излучения, направленными справа и слева на поверхности (пласты) дощечки так, что профиль относительной влажности древесины внутри дощечки приобретает вид 5 и монотонно изменяется в последовательные моменты времени t_1 , t_2 , t_3 и t_4 . При снижении относительной влажности древесины ниже предела гигроскопичности $w_{\text{п.л.}}=30\%$, древесина начинает усыхать (сжиматься). Это сжатие начинается на внешних поверхностях дощечки. Поэтому, если расколоть дощечку топором в момент времени t_1 , то половинки дощечки выгнутся жолобом (вдоль и поперёк) под действием сжавшегося внешнего слоя.

Но если дощечку в момент t_1 не раскалывать, то с течением последующего времени сохнувшие внешние слои не смогут усыхать (сжиматься) в полной мере, поскольку им это не позволяют пока не усыхающие (но чуть-чуть пластично сжимающиеся) внутренние слои. Для этого явления есть специальный термин: усушку в условиях сопротивления (противодействия) других (не усыхающих) зон называют усадкой. Усушка – это

максимально возможная усадка древесины. Усадка, как и усушка, есть не что иное, как сжатие при высушивании древесины (и не только древесины, но и глины, и кожи и т. п.). Но усушка – это гипотетический процесс, когда древесине ничто не мешает сжиматься, а усадка – это реальный процесс в условиях возможных противодействий со стороны других зон древесины или внешних воздействий. Так, например, если кожу крупного рогатого скота сушить в свободном состоянии, то она сильно усохнет («сядет»), сожмётся, покоробится и сморщится. А если кожу наклеить на полированную металлическую поверхность (барабан) и сушить нагретом этой металлической поверхности, то кожа не сможет усохнуть (сжаться). Она сможет лишь дать лёгкую усадку, после чего натягивается на барабане и превращается в «выглаженный» идеально ровный товар. Так и в случае древесины: к моменту времени t_2 внешние слои дадут лишь лёгкую усадку и, с силой растягиваясь за счёт сопротивления внутренних слоёв, высохнут, зафиксировав свои размеры. Но если подсушенная древесина имеет малую прочность на разрыв, то она может растрескаться снаружи (порваться, лопнуть, разорваться), как и внешние слои бревна (полена) на рисунке 86. Возможность образования трещин становится ясной, если учесть, что нам надо по существу выпрямить согнувшиеся половинки дощечки 2. Так или иначе, если расколоть дощечку в некий момент времени t_2 , то обе половинки дощечки будут ровными.

В последующие моменты времени начнёт усыхать внутренняя зона дощечки, пытаясь сжаться. Если расколоть дощечку в момент времени t_3 , то половинки выгнутся уже в другую сторону под действием сжавшихся внутренних слоёв. Но если дощечку не раскалывать, то внешние сухие нежимаемые (не имеющие пластичности) слои не дадут сжаться сохнувшим внутренним слоям, так что после высушивания в момент времени t_4 дощечка сохранит (пусть уменьшенную в размерах), но явно прямоугольную форму торца. При этом величина усадки дощечки будет меньше той гипотетической усушки, которая была бы при очень медленной сушке очень тонких образцов древесины. Именно этот факт является причиной возможного образования новых трещин, в том числе внутренних.

Величины усушки, измеряемые по ГОСТ16483.35-88 на образцах 20'20'30 мм по процентному уменьшению длин относительно влажного состояния, у разных пород древесины разные (см. таблицу 16). Вдоль волокон усушка всех пород очень мала (менее 1%). В тангенциальном (тангентальном) направлении (по окружности вокруг сердцевины) величина усушки 8–12% значительно больше, чем в радиальном направлении 4–8%. Большая величина тангенциальной усушки указывает на склонность брёвен к растрескиванию, особенно при быстрой усушке, в том числе и при быстром нагреве древесины при горении.

Общеизвестно, что поленья при горении (в том числе и брёвна строе- ний при пожарах) шипят, трещат, щёлкают, «стреляют» и даже взрыва- ются. Причин для подобных акустических явлений много, и было бы странным, если бы дрова при горении вообще «молчали». Акустические шумы при горении можно разделить на непрерывные и разовые (эпизо- дические). Непрерывные шумы проявляются в виде шипений (при тур- булентном истечении водяных паров и газообразных продуктов пироли- за из пор древесины) и в виде гула (от турбулентного пламенного горения). К условно непрерывным шумам относятся также всем извест- ные потрескивания древесины при горении, обусловленные хрупкими растрескиваниями древесного угля поперёк волокон, так что характер- ные потрескивания возникают только после появления обугливающего- ся слоя и однозначно свидетельствуют о начавшемся горении (а не про- сто быстрой сушке). Эпизодические щелчки вызываются отскоками фрагментов (чешуек) обугливающегося слоя. При этом любое коробле- ние приводит к хрупкому растрескиванию угольного слоя. Так даже горящая бумага начинает «шелестеть» лишь после обугливания и при обя- зательных съёживаниях и изгибаниях горячего углеродного остатка. А при короблениях массивных поленьев возможны резкие расколы не только обугленного слоя, но и древесины, в том числе за счёт давлений паров воды и газов пиролиза в глубине древесины. Выбросы горячих га- зов при этом сопровождаются хлопками и взрывами при пожарах. Одна- ко причины треска древесины при горении до конца не ясны. Так, одни считают, что ошкуренная берёза при горении трещит намного меньше, чем осина, потому, что у берёзы наименьшая разность тангенциальной и радиальной усушек (потому и не коробится), а у осины – наибольшая. В то же время, бук с высокой разностью усушек вообще не трещит при го- рении. Поэтому другие считают, что чем твёрже древесина (и чем выше прочность на разрыв), тем меньше она трещит (см. таблицу 16). Во вся- ком случае малопрочная пихта трещит при горении очень сильно. Разо- браться и найти истинную связь треска при горении с растрескиванием трудно. Так, породы для художественной резьбы разделяются на сильно- растрескивающиеся (граб, ясень, клён, бук) и слаборастрескивающиеся (ель, сосна, пихта, кедр, лиственница).

Крайне противоречивой древесиной в народе считается осина. Если дрова из ясеня и берёзы горят даже сырыми, то свежесрубленная «осина не горит без керосина». Осину редко заготавливают для дров, поскольку (как и сосну) используют для строительства (в частности срубов для бань). Считается, что осина «неваркая», даёт «мало жару», в сухом состо- янии быстро горит и выжигает сажу из дымоходов. Осина мало коптит, из неё издавна «щипали лучину» для освещения, а сейчас делают спички.

При горении осина потрескивает («искрит», «мелко» трещит) в отличие от сосны, например, издающей треск редко, но зато мощно («стреляет»).

Древесина любых пород способна пластично (как пластилин) медленно деформироваться, но только во влажном состоянии, причём тёплом. Так, хорошо распаренная для гнутья дрань (лучина) для плетения коробов (например, в виде палочек для мороженого «эскимо» толщиной 1–2 мм) с относительной влажностью 25–30% при температуре 100°C способна пластично (не ломаясь) сжиматься вдоль волокон на 30% и растягиваться на 2–5%, а в поперечном направлении сжиматься и растягиваться ещё сильнее. Это особенно отчётливо проявляется в случае листов шпона, которые можно скрутить во влажном состоянии в рулон и так высушить с последующим сохранением сухой древесины своей новой формы. Подобные процессы были хорошо отработаны, в частности, в эпоху фанерного авиастроения, но сейчас забываются.

Идеология предотвращения коробления проще идеологии предотвращения растрескивания при сушке. Если доски сохнут в зажатом выровненном состоянии, то это предотвращает искривления «жёлбом» (рис. 86), «саблей», «пропеллером». Причём, если выровнять (или, наоборот, согнуть) доску бывает трудно, то удержать доску в фиксированной форме потом при сушке не представляет труда. Если же доска всё же покоробится, то в принципе её можно вновь увлажнить (распарить) и придать ей иную форму. Но если доска треснула, то устранить трещину, конечно же, невозможно. Даже при медленной сушке в тени торцы поленьев обычно растрескиваются. Если древесина используется для резьбы по дереву, то растрескавшиеся торцы поленьев обрезают: в глубине полена трещин может и не быть. Для предотвращения пересушивания и растрескивания торцов они при сушке замазываются олифой, битумом или забиваются рубероидом, фанерой. В случае берёзы паронепроницаемую кору надрезают. Для предотвращения короблений и растрескиваний в промышленности рекомендуются длительные сушки пиломатериалов в распаренном состоянии (несколько суток) при высоких температурах 80–100°C перегретым паром. Однако, такие пропарки приводят к значительному ухудшения прочностных свойств древесины. В частности, распаренная древесина становится впоследствии хрупкой (ломкой) и даже супучей при резании стамеской (ножом, топором) и строгании рубанком. Причины разрушения древесины при паровой обработке примерно те же, что и при варке картофеля, состоящего из крахмала (полисахарида, подобного целлюлозе). Наиболее заметные коробления имеют место при распиловках искривлённых стволов деревьев. При этом извилистость досок после сушки в свободном состоянии определяется разнонаклонностью волокон в доске. Так, слабокоробящаяся в коротких брусках берёза тем не менее очень сильно коробится в длинных досках.

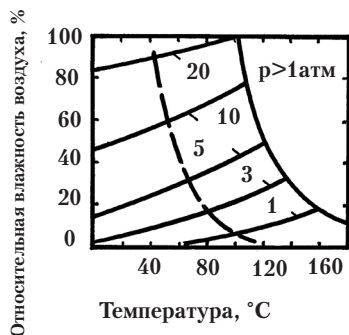


Рис. 88. Температурные зависимости равновесной относительной влажности воздуха над древесиной любой породы, но разной влажности. Над кривыми приведены значения относительных влажностей древесины в процентах. Пунктирная кривая – хомотермальная кривая для точки росы 40°C. Точки пересечения хомотермальную кривой с кривыми влажности указывают на влажность древесины в банных условиях.

В реальных условиях бань древесина постоянно то увлажняется (и набухает), то сохнет (и усыхает), в результате чего обшивка бань постепенно растрескивается (рассыхается) особенно при быстрых сушках и набуханиях. В пределах хомотермальной кривой в интервале температур 40–120°C равновесная влажность древесины колеблется в пределах 0,5–28%, то есть во всём диапазоне гигроскопичности (рис. 88). Напомним, что стандартные климатические условия жилых помещений (температура $20^\circ \pm 2^\circ \text{C}$, относительная влажность воздуха $65 \pm 5\%$), принятые при испытаниях древесины в деревообрабатывающей промышленности, соответствуют значению равновесной относительной влажности древесины 12%, вследствие чего такая влажность древесины называется нормализованной и отвечает требованиям мебельного производства.

Наличие свободной и связанной влаги в древесине влияет на все свойства древесины, поэтому приводить цифровой материал по древесине без указания её влажности бессмысленно. Так, плотность древесины при увлажнении может возрастать в 2–3 раза

(рис. 89), коэффициент теплопроводности повыситься в 4–5 раз (рис. 90), а теплота сгорания снизиться почти в 2 раза (рис. 91). Так, если теплота сгорания абсолютно сухой древесины составляет 4500 ккал/кг, то каждый 1%

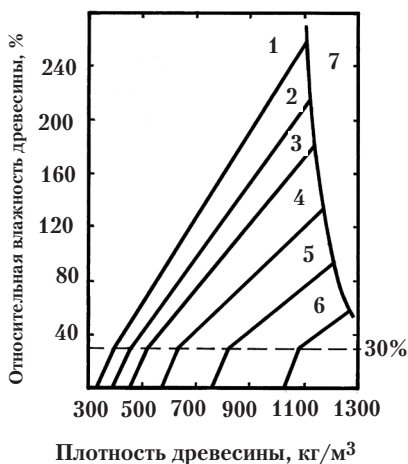


Рис. 89. Зависимость плотности древесины от относительной влажности древесины. Прямые имеют излом при влажности 30% ввиду усадки древесины при удалении гигроскопичности – связанной влаги. 1 – пихта, 2 – ель, 3 – сосна, 4 – берёза, 5 – граб, 6 – самшит, 7 – максимально достижимые значения плотности и относительной влажности древесины.

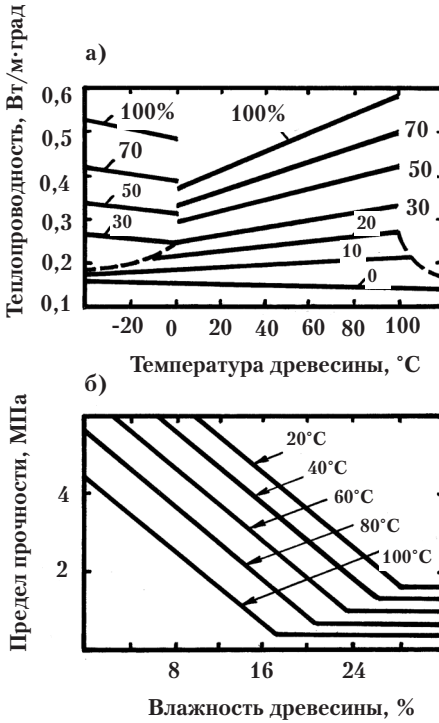
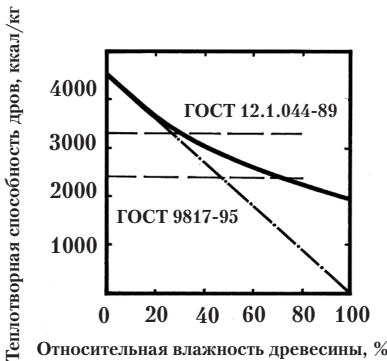


Рис. 90. Свойства древесины: а – температурная зависимость теплопроводности древесины берёзы поперёк волокон при различных относительных влажностях древесины, указанных у кривых в процентах, б – предел прочности берёзы при растяжении в тангенциальном направлении при различных температурах древесины, указанных у кривых в градусах Цельсия.

влажности приводит к снижению теплоты сгорания на 7 ккал/кг за счёт необходимости нагрева и испарения воды и ещё на 45 ккал/кг за счёт снижения доли сухой древесины в дровах. Для практических расчётов пожарная оборона рекомендует использовать нормативное

значение минимальной теплотворной способности древесины 3300 ккал/кг по ГОСТ 12.1.044-89 «Положения безопасности. Общие требования». Вместе с тем, энергетики рекомендуют ориентироваться на нормативное значение минимальной теплотворной способности дров 2400 ккал/кг по ГОСТ 9817-95 «Аппараты бытовые, работающие на твёрдом топливе».



Важным моментом является то, что даже абсолютно сухая древесина даёт при сгорании очень много воды, намного больше, чем обычно содержится воды в самих реальных дровах. Поэтому, влажность древесины, очень сильно влияющая на теплотворную способ-

Рис. 91. Зависимость теплотворной способности дров от относительной влажности древесины (жирная сплошная кривая), горизонтальные пунктирные прямые – значения по ГОСТ.

ность дров, тем не менее на влажность дымовых газов влияет слабо. Так, переход с дров влажностью 10% на дрова влажностью 20% повышает влажность дымовых газов отнюдь не в два раза, а всего лишь на 15–20%.

5.6.3. Пиролиз древесины

Воспламенение и горение древесины есть следствие её нагрева до высоких температур в воздухе. В холодном состоянии древесина воздухом не окисляется. При нагреве древесина термически разрушается с образованием легкогорючих веществ, которые могут воспламеняться и поддерживать дальнейшее горение древесины. Поэтому для правильного понимания процессов горения необходимо знать как термически разрушается древесина.

Первичное термическое разрушение древесины происходит внутри полена, а значит без доступа воздуха (ввиду слабой газопроницаемости древесины). Термическое разрушение древесины в инертной среде (без доступа кислорода воздуха или иных окислителей) называется термической деструкцией, термическим разложением или пиролизом. В дальнейшем мы будем для краткости пользоваться термином «пиролиз», хотя сразу оговоримся, что «руг» по-гречески означает огонь, и поэтому точнее было бы понимать под термином «пиролиз» разрушение в огне (то есть при горении в кислороде), а не разрушение в инертном газе. Так, например, в лесоведении «пирологией» называют науку о лесных пожарах и и вызываемых ими изменениях в лесу.

При нагревании древесины без доступа воздуха (такой процесс называется «сухой перегонкой») сначала при температурах 100–150°С происходит полное испарение всей свободной и связанной (гигроскопической) воды, затем при 150–275°С происходит начальный пиролиз с потреблением теплоты. При температурах 275–450°С происходят главные реакции распада веществ древесины, причём с бурным выделением тепла (с саморазогревом древесины). Наконец, при 450–550°С происходит последняя стадия пиролиза, требующая подвода теплоты извне и заканчивающаяся образованием древесного угля, сохраняющего анатомическое строение древесины. Промышленный древесный уголь по ГОСТ 7657-84 имеет «кажущуюся» (в воде) плотность 370 кг/м³, насыпную плотность после размола 210 кг/м³, температуру воспламенения 340°С, НКПВ пыли 128 г/м³, ПДК пыли 6 мг/м³. Древесный уголь в форме реальных «углей» (в виде обугленного слоя на древесине) имеет плотность 190 кг/м³, насыпную плотность (104–180) кг/м³, коэффициент теплопроводности 0,074 Вт/м·град. В результате всего цикла пиролиза образуется древесный уголь, жижка и горючие газы. Жижка при отстаивании разделяется на два слоя – верхний водный и нижний смоляной. Из водного слоя впоследствии выделяют

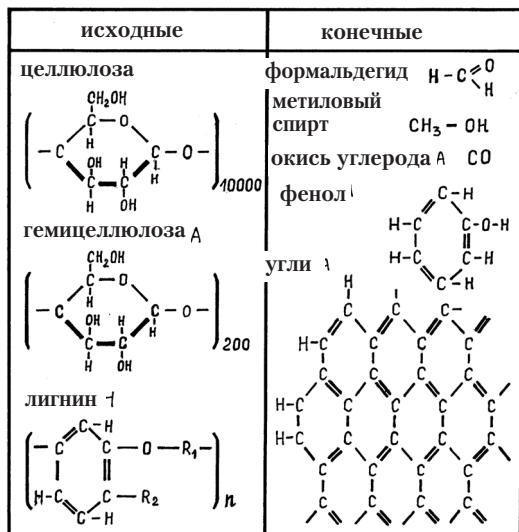


Рис. 92. Химическая структура древесины и некоторых продуктов пиролиза (исходные и конечные продукты пиролиза древесины). Состав гимецеллюлозы приведён для гексозной части (пентозная часть содержит в кольце 5 углеродных атомов).

уксусную кислоту, метиловый спирт, ацетон и другие продукты. Из смоляной части выделяют дёготь, жидкие топлива, антисептик креозот, которым пропитывают железнодорожные шпалы. Выход углей, жижки и газов составляет по массе соответственно 33%, 52% и 15% для

берёзы и 38%, 44% и 18% для сосны (Б.Н. Уголев, Двевесиноведение, М.: Академия, 2004 г.).

Древесина состоит из трёх типов натуральных полимеров – длинноцепной целлюлозы, короткоцепных гемцеллюлоз (пентоз из пятичленных колец и гексоз из шестичленных колец) и лигнина, состоящего из бензольных колец (рис. 92). Пиролиз любых органических соединений идёт через разукрупнение (дробление, деление, разрыв, крекинг) молекул (и цепей молекул) с отделением кислородных соединений углерода, летучих углеводородов, молекул водорода и воды. Одновременно идёт агрегация углеводородных остатков в углерод через формирование бензольных колец C_6H_6 (рис. 92), которые объединяются в двойные бензольные кольца (нафталиновые), затем в тройные (антраценовые) и так далее вплоть до сеток колец (микрористаллов графита, а также высших непредельных углеводородов C_nH_m). При пиролизе твёрдых углеводородов образуется кокс (в случае каменного угля) или древесный уголь (в случае древесины). При пиролизе углеводородных газов (метана, пропана и т. п.) и паров углеводородных жидкостей (бензина, керосина, бензола и т. п.) образуется газозвесь мелких углеродных частиц (чёрный дым), при осаждении дающая сажу (копоть). В любом случае образуется углерод в так называемой аморфной форме – в виде микрористаллического (рентгеноаморфного) графита, имеющего связи с С–Н, а потому легковоспламеняющегося. Наибольшее дымление даёт лигнин (которого очень много в коре берёзы), но лигнин даёт и в 1,5 раза больше тепла при сгорании, чем целлюлоза.

Считается, что пиролиз начинается с пентозной части гемицеллюлоз и лигнина. Наибольшую вероятность обугливания имеет лигнин, поскольку он уже содержит в своём составе бензольные кольца (рис. 92). В этом легко убедиться. Достаточно положить на разогревающуюся чугунную плиту дровяной печи (или комфорку кухонной электроплиты) образец древесины (например, обычную осиновую спичку без головки) и образец материала из практически чистой целлюлозы – хлопка, льна, бумаги (непроклеенных сортов, например, туалетной). Хлопок (в виде ваты или марли) начинает буреть при 220–240°C (именно поэтому максимальная стандартная температура утюгов устанавливается равной 220°C). Выделяющихся горячих газов глазами не видно, поскольку они абсолютно прозрачны и бесцветны (как воздух) вплоть до плазменных температур 5000–7000°C, а химических реакций горения, которые могли бы окрасить газ, пока нет (температуры самовоспламенения газов превышают 450°C). При температурах 320–340°C хлопок начинает чернеть и комкуются (сжимается), над хлопком появляется белый дымок – это пары выделяющихся труднокипящих жидкостей конденсируются в холодном воздухе, превращаясь в туман. Самовоспламенение в виде появления тления обугленного остатка наблюдается при температуре выше 440°C. Древесина (осиновая спичка) начинает буреть уже при температурах 180–190°C, начинает выделяться белый дымок (туман жидкостей) при 230–250°C, а при 300°C становится абсолютно чёрной с полным сохранением исходной формы спички. Это указывает, что сажа от разложения лигнина оседает на каркасе целлюлозы. Поскольку именно лигнин вызывает раннее выделение горючих газов и сажи, удаление лигнина гидролизом снижает пожароопасность и дымление древесины. Так известно, что некоторые народы в древности для обогрева курных помещений использовали именно вымоченный в реке, а затем тщательно высушенный хворост.

Процессы пиролиза, как правило, завершаются при нагреве древесины до 500–600°C. Но если продукты пиролиза заключить в герметичную ёмкость (бомбу) и нагреть их до более высоких температур, то состав продуктов пиролиза изменится. Этот факт очень важен для анализа процессов горения, поэтому вкратце остановимся на основных особенностях вторичного пиролиза. Во-первых, жидкие и газообразные продукты первичного пиролиза разрушаются до простейших соединений (H_2O , CO_2 , CO , H_2 и т. п.) и добавочного количества углерода как в форме древесного угля, так и в виде сажи (в том числе и в виде дыма). При этом даже метан образует сажу именно через бензольные кольца. Во-вторых, древесный уголь (углерод) начинает газифицироваться – реагировать с водяными парами $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$. Количество воды в продуктах пиро-

лиза очень велика, что видно хотя бы из того, что балансовую химическую формулу целлюлозы и гемицеллюлозы ($C_6H_{10}O_5$) можно представить в виде $[C_6(H_2O)_5]_n$, то есть комбинации (смеси) углерода и воды (поэтому целлюлозу называют углеводом). Приведём расчётный состав продуктов реакции газификации углерода в синтез-газ $C+H_2O \rightarrow CO+H_2$ в условиях атмосферного давления газовой фазы $p_0=p(H_2O)+p(CO)+p(H_2)=1$ атм, где $p(H_2O)$, $p(CO)$ и $p(H_2)$ – парциальные давления водяных паров, окиси углерода (угарного газа) и водорода соответственно (Н.В. Лавров, А.П. Шурыгин, Введение в теорию горения и газификации топлива, М.: АН СССР, 1962 г.):

Температура, °С	700	800	900	1000	1100
Температура, °К	973	1073	1173	1273	1373
$p(H_2O)$ в % об. (10^{-2} атм)	90,66	65,94	29,38	8,1	2,08
$p(CO)$ в % об. (10^{-2} атм)	4,67	17,03	35,31	45,95	48,96
$p(H_2)$ в % об. (10^{-2} атм)	4,67	17,03	35,31	45,95	48,96

Приведённые численные данные могут быть легко пересчитаны на другие давления газовой среды p_0 , исходя из соотношений равновесия $p(C) \cdot p(H_2O) = K_1(T) \cdot p(CO) \cdot p(H_2O)$, где $p(C)$ – давление паров углерода (зависит только от температуры), $K_1(T)$ – коэффициент равновесия реакции (зависит только от температуры), $p(CO) = p(H_2O)$. При этом можно показать, что $p(H_2O)/p(CO) = A_1(f_1(T)p_0)^{1/2}$, где $f_1(T) = K_1(T)/p(C)$, A_1 – коэффициент пропорциональности. Таким образом, снижение давления p_0 (то есть уменьшение количества воды) приводит к сдвигу реакции вправо (то есть к более высокому преобразованию H_2O в CO).

В-третьих, древесный уголь (углерод) начинает газифицироваться в ходе реакции $C+CO_2 \rightleftharpoons 2CO$. Приведём расчётный состав продуктов реакции при давлении газовой среды $p_0=p(CO_2)+p(CO)=1$ атм:

Температура, °С	600	700	800	900	1000	1100	1200
Температура, °К	873	973	1073	1173	1273	1373	1473
$p(CO_2)$ в % об. (10^{-2} атм)	99,86	98,38	90,05	64,7	27,2	8	2
$p(CO)$ в % об. (10^{-2} атм)	0,14	1,62	9,95	35,3	72,8	92	98

Пересчёт на другие давления ведётся по соотношениям $p(C)p(CO_2) = K_2(T)p^2(CO)$, $f_2(T) = K_2(T)/p(C)$. При этом $p(CO_2)/p(CO) = A_2(f_2(T)p_0)^{1/2}$, то есть снижение давления p_0 сдвигает реакцию вправо. В целом, реакция углерода с CO_2 (углекислым газом) начинается примерно при температурах на $100^\circ C$ выше, чем реакция с H_2O (водой), а учитывая, что воды в продуктах пиролиза намного больше, чем углекислого газа, то реакция газификации водой является ведущей.

Продукты высокотемпературного «вторичного» пиролиза, состоящие преимущественно из СО и Н₂, называются синтез-газом или газогенераторными газами. Такие газы вырабатывались в первой половине XX века в огромных масштабах для лесохимических производств, отопления, а также для использования в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания. До сих пор часто вспоминают довоенные советские грузовики-полупотрки с бортовыми газогенераторами, вырабатывавшими для своего двигателя горючий синтез-газ из древесных чурок длиной сантиметров десять, которые по государственному план-заказу (разрядке) заготовливались колхозами в огромных количествах.

Характер термического разрушения древесины при температурах ниже 300–350°С практически не зависит от того, в инертной среде или воздушной ведётся нагрев древесины. При более высоких температурах уже возможны процессы дополнительного окисления свободным кислородом $C_nH_mO_k + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$, в том числе аморфного углерода по реакции $C + O_2 \rightarrow CO_2$. Пиролиз называется окислительным в том случае, когда количество вводимого кислорода настолько мало, что теплота окисления остаётся намного меньшей, чем подвод тепла для пиролиза извне. Если же количество подводимого кислорода уже начинает обеспечивать большую величину теплового эффекта окисления, то окислительный пиролиз приобретает название горения.

В заключение напомним, что сухая безводная окись углерода СО (угарный газ) практически не реагирует с кислородом О₂ до температуры 700°С. Выше 700°С протекает медленная гетерогенная реакция, то есть реакция идёт не в объёме, а с первоначальной сорбцией СО на поверхности твёрдых материалов. Причём некоторые вещества способны существенно снизить температуру окисления СО (например, в составе катализаторов для очистки выхлопных газов автомобилей от угарного газа). На скорость окисления углерода сильно влияет присутствие даже небольших количеств водяного пара или водорода, при этом реакция может стать даже гомогенной (в объёме) вне поверхностей твёрдых материалов.

5.6.4. Пламенное горение горючих газов

Образующиеся при пиролизе древесины угли и горючие газы сгорают на воздухе по-разному, причём и горючие газы сгорают по-разному в зависимости от того, смешаны ли они с воздухом предварительно в горючую смесь (гомогенные пламена) или не смешаны или частично смешаны (гетерогенные диффузные пламена).

Метан через жиклёр 1 подаётся в модельную горелку 2, где струйно смешивается с подсосываемым через отверстия 3 «первичным» возду-

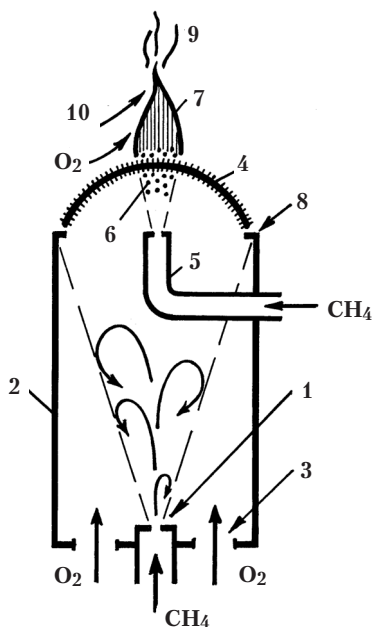


Рис. 93. Принципиальная схема модельной бунзеновской горелки на природном газе – метане: 1 – труба с жиклёром для подачи метана, 2 – корпус горелки как смесительного устройства, 3 – воздухоподающие отверстия, 4 – голубая полоска прозрачного пламени, 5 – трубка для ввода дополнительного метана, 6 – сажистые частицы, образующиеся в результате пиролиза, 7 – светящееся светло-жёлтое пламя, состоящее из раскалённых сажистых частиц, 8 – стабилизатор пламени (застойная зона), 9 – клубы дыма (копоть), 10 – «вторичный» воздух, подмешивающийся в светящееся пламя и окисляющий сажистые частицы.

Метан в смеси с подмешанным воздухом сначала прогревается за счёт теплопроводности от фронта горения, затем начинает термически разлагаться (как при пиролизе). Образующиеся активные радикалы при наличии кислорода тотчас вступают в первичные реакции окисления (с выделением тепла $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_2 + \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}^* + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$ и т. д.), а затем всё это догорает во внешнем («вторичном») воздухе 10.

Развивающиеся температуры горения метана обычно не превышают $1200\text{--}1500^\circ\text{C}$, а при таких температурах газы ещё не светятся и остаются невидимыми. Поэтому горение метана было бы невидимым, если бы волею природы во всех процессах горения углеводородных топлив не образовывался бы в следовых количествах радикал C_2 (молекула их двух атомов углерода), излучающий на длинах волн $5000\text{--}5200 \text{ \AA}$ интенсивный свет синего цвета (так называемые спектральные полосы Свана), а также радикал CH , слабо излучающий на длине волны 4300 \AA . Однако, если не обращать внимания на лёгкое синее свечение (в самом начале процесса горения), можно сказать, что пламя горелки с предварительным смешением газа с воздухом, является практически не светящимся. Это оказалось удобным, например, для нагрева предметов в пламени без копоти (в частности, кухонных кастрюль). Немецкий химик Бунзен, придумавший такую горелку в середине XIX века и впервые получивший прозрачные пламена, успешно использовал её для спект-

рального анализа соединений металлов. Так, оказалось, что соли натрия (поваренная пищевая соль, в частности) окрашивают пламя в жёлтый цвет, меди – в зелёный, кальций – в малиновый, кадмий – в красный и т. п.). Издавна окраска пламени свечением атомов металлов широко использовалась для производства сигнальных ракет, салютов, цветных факелов и т. п. Этот эффект можно использовать и в представительских курных банях для декоративной окраски пламени очага, например, путём замачивания дров в рассолах с последующей восстановительной сушкой.

Теперь введём в голубое пламя бунзеновской горелки дополнительный метан по специальной трубке 5 (рис. 93). Поскольку эта струйка метана не смешана предварительно с воздухом, то она будет сначала нагреваться в пламени фактически в отсутствии кислорода внутри себя и будет претерпевать обычный пиролиз (может быть частично окислительный пиролиз, но явно в условиях дефицита кислорода). В таком случае метан разложится (через множество стадий химического превращения) на водород и сажу (чёрный дым) $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_n\text{H}_m + 2\text{H}_2$. Сажистые частицы, раскалившись, будут излучать свет, в частности, при температуре 1200°С светло-жёлтого цвета. Такое привычное пламя с раскалёнными сажистыми частицами называется светящимся. Такие пламена использовались раньше в XIX веке в газовых фонарях для освещения улиц крупных городов. Используются они для освещения в свечах, керосиновых осветительных лампах, факелах, лучинах. Именно такие пламена в виде светящихся «языков» пламени возникают и в печах при горении дров.

Образовавшиеся в результате пиролиза сажистые частицы и водород постепенно сгорают по мере поступления (подмешивания) воздуха в струю. Если сажистые частицы C_nH_m по какой-либо причине не догорают до конца (слишком крупные частицы сажи, мало воздуха, захлаживание струи), то они укрупняются (агрегируются, поликонденсируются), превращаются из светящихся языков пламени в чёрный дым 9 или копоть на поверхностях. Важно подчеркнуть, что в осветительных приборах (например, газовых уличных фонарях) хоть и специально создают сажу (для свечения), но специально её потом и дожигают (для чистоты стёкол фонаря).

Получить светящееся пламя можно не только подачей дополнительного метана по трубке 5, но и уменьшением (или прекращением) подачи воздуха через отверстия 3. То есть при недостатке воздуха прозрачное голубое пламя начинает светить, а может быть и коптить.

В прозрачное голубое пламя можно погрузить массивную металлическую ложку (или, например, дно металлической кастрюли), и ложка не закоптится. Если же пламя светится (даже если внешнего дымления 9 не наблюдается), то ложка в верхней части пламени покрывается копотью в

виде «сухой» легкостираемой сажи (порошка углерода), а в более низких зонах пламени – липкой или твёрдой копотью в виде плёнки «креозота». В голубой части пламени свечи касание ложки не вызывает дымления.

Выше мы рассмотрели в качестве модельного горючего газа – метан. Однако, качественные результаты не изменятся, если вместо метана использовать любые иные горючие газы (или пары жидкостей). При этом процессы горения и пиролиза идут параллельно, и количество дыма зависит от типа газа и количества кислорода. Горение газообразных продуктов пиролиза древесины сопровождается появлением большого количества сажистых частиц, ввиду лёгкости сажеобразования из ароматических фрагментов лигнина (уже имеющих в своём составе бензольные кольца) с высокой летучестью (температуры кипения бензола 80°С, толуола 110°С, ксилола 144°С, стирола 145°С, нафталина 218°С).

Особенностью древесины как топлива является невозможность подвода воздуха к каждой точке поверхности каждого полена в печи, вследствие чего газообразные продукты пиролиза невозможно сразу же смешать с воздухом перед подачей в зону пламенного горения. Поэтому пламена древесины в печах неминуемо являются светящимися и коптящими. Если смотреть на горящую спичку с торца, то отчётливо видна прозрачная, как будто бы ничем не заполненная зона вокруг остова спички 4 (рис. 94). В ней поток невидимых глазом газообразных продуктов пиролиза устремляется наружу и «отталкивает» голубую зону горения от поверхности спички, в ней же поток тепла идёт от зоны горения на поверхности древесины и обеспечивает её пиролиз. Если голубая зона приближается к древесине, то поток тепла на древесину становится больше, образование газообразных продуктов пиролиза увеличивается, и голубая зона «отталкивается» от древесины. Иными словами, процесс горения является саморегулирующимся. Ввиду нехватки кислорода в голубой зоне горения образуются раскалённые сажистые частицы, которые и обра-

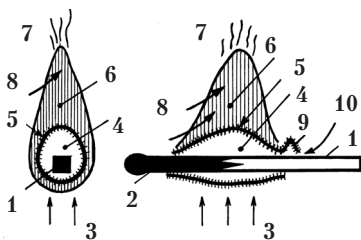


Рис. 94. Схема пламени спички: 1 – остов спички (осиновая палочка), 2 – обгоревший остов, 3 – потоки конвективного воздуха, 4 – прозрачная зона, заполненная невидимыми газообразующими продуктами пиролиза древесины, 5 – голубая полоска прозрачного пламени, 6 – светящееся светло-жёлтое пламя, 7 – копоть, 8 – «вторичный» воздух, 9 – голубое пламя, не сопровождающееся жёлтым пламенем, обусловлено выходом наиболее насыщенных кислородом

газообразных продуктов пиролиза (формальдегида, спиртов и т. п.) и подсосом воздуха по направлению 10, смешивающегося с газами пиролиза перед подачей в пламя. Напомним, что остов спички пропитан веществами, предотвращающим горение (тление) угольного остатка 2 в противопожарных целях.

зуют светящееся пламя 6 в виде языка светло-жёлтого цвета, называемое в народе огнём. Динамика изменения вида пламени вдоль спички справа налево фактически представляет собой временную развёртку процесса пламенного горения дровяного полена в печи.

Вклад теплоты сгорания сажистых частиц обычно весьма невелик (доли процента), и поэтому дожигать их какими-то специальными дорогостоящими методами энергетически невыгодно (если это не связано с необходимостью чистоты аппаратуры-посуды или с экологическими соображениями). Сгорающие сажистые частицы в большинстве случаев не нагревают продукты сгорания, а охлаждаются их за счёт лучистой теплопередачи. Но излучение тепла с обычных бытовых пламён невелико. Так, например, спичка или свечка обычной мощности 50 Вт отдаёт в виде излучения не более 6–10 Вт тепла. В то же время, если посчитать теоретически возможный лучистый поток со свечи обычного размера и температурой 1000°C , то в предположении абсолютно чёрного тела он приблизится к полной мощности свечи 50 Вт. Значит, жёлтое пламя свечи прозрачное, в чём легко убедиться с помощью фонарика или лазерной указки (см. раздел 5.7.11).

5.6.5. Воспламенение и горение дров

Для простейшего качественного анализа возьмём деревянную дощечку и положим её плашмя на тлеющие угли очага (рис. 95). Ясно, что доска должна нагреваться снизу, а значит и дрова в кострах и в печах вспыхивают и горят снизу. Поминутно перевёртывая дощечку для осмотра нагреваемой стороной вверх, можно заметить, что сначала обуглива-

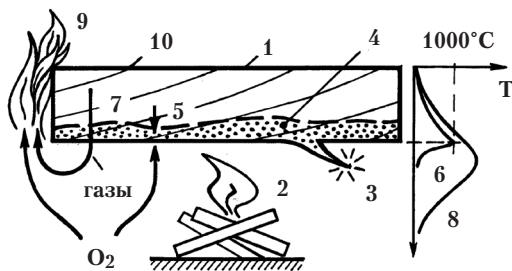


Рис. 95. Воспламенение и горение деревянной дощечки, закладываемой на угли (пламя) в печи: 1 – деревянная дощечка (вид с торца), 2 – угли (пламя) в печи, 3 – заусеница, воспламеняющаяся в первую очередь, 4 – пористый газопроницаемый обугливающийся слой, 5 – газообразные

горючие продукты пиролиза (летучие), сгорающие в обугливающемся слое в режиме тления, 6 – распределение температуры при тлеющем горении, 7 – летучие, сгорающие вне древесины в форме пламени, 8 – распределение температуры при пламенном горении, 9 – пламя (факел), охватывающее нижнюю пласт (сторону) доски и вырывающееся вверх за кромкой доски, 10 – годовые слои древесины (иллюстративно).

ются и начинают тлеть заусеницы (ворсинки) на поверхности доски 3. Поэтому для облегчения загорания дров, перед растопкой на поленьях иногда делают топором крупные насечки (заусенцы, заструги). И наоборот, для предотвращения преждевременного воспламенения, доски обжигают паяльной лампой (газовой горелкой, факелом, лучиной) для удаления ворсистости поверхности древесины, например, на потолке курной бани (см. раздел 5.7.18).

Конечно, воспламенившиеся заусенцы в виде микроугольков могут поджечь дощечку лишь в том случае, если она уже вся в своей массе предварительно нагрета до температуры воспламенения. Наша же дощечка в эксперименте пока холодная, так что воспламенившиеся заусеницы пока не могут воспламенить массив дощечки.

Продолжая нагревать дощечку на раскалённых углях, мы замечаем, что поверхность нижней пласти (широкой стороны) дощечки начинает постепенно буреть, а затем и чернеть (обугливаться). Однако, при перевёртывании доски ни тления, ни устойчивого пламени на её горячей стороне пока нет. Лишь местами видны ленивые голубые прозрачные вполухи (см. поз. 9 на рис. 94), похожие на горение метана в кухонной плите или спирта в медицинской спиртовке. Это указывает на то, что из доски начинают выделяться горючие газы, причём, видимо, простейшие вещества (типа спиртов, альдегидов, кетонов, окиси углерода и т. п.) в незначительном количестве и в виде смеси с воздухом. Все эти соединения имеют высокую подвижность в порах древесины (особенно в продольном направлении) ввиду высоких коэффициентов диффузии в воздухе $D_T = D_0(T/273)^n$, где T – температура в градусах Кельвина (П.А. Долин, Справочник по технике безопасности, М.: Энергоатомиздат, 1984 г.):

Вещество, продукт	D_0 , см ² /сек	n
Водород	0,660	1,70
Формальдегид	0,146	1,81
Метиловый спирт	0,129	2,08
Вода	0,216	1,80
Окись углерода	0,149	1,72
Двуокись углерода	0,138	1,80
Метан	0,196	1,76
Бензол, фенол	0,077	1,86
Нафталин	0,062	1,89
Бензин	0,061	2
Керосин	0,046	2
Уайт-спирит	0,050	2
Масла автотракторные	0,035	2

При дальнейшем прогреве дощечки обугливающийся слой на нижней пластине (на широкой стороне) начинает тлеть (то есть гореть без пламени). При этом из дощечки (причём преимущественно с торцов) начинает выделяться белый (бурый) дым. Это конденсат (роса, туман) жижки, выходящей из пор древесины в виде газа (паров) сначала диффузионно, а затем и под напором (струями). Наконец, на границе с кромкой (узкой стороной) белый дым воспламеняется, возникает светло-жёлтое пламя, впоследствии охватывающее всю нижнюю пластину. Это означает, что доска воспламенилась, и если её извлечь из очага, она может гореть на воздухе самостоятельно.

Горение может попеременно переходить то в тлеющий режим, то в пламенный (факельный, огневой). Оба режима тесно связаны между собой общей природой, но отличаются химизмом и кинетикой. В режиме тления главным (ведущим) процессом является горение твёрдых продуктов пиролиза (углей). В режиме пламенного горения ведущим является горение газообразных продуктов пиролиза. В режиме тления газообразные продукты выделяются медленно (столь же медленно, как горит обугленный слой древесины), не могут воспламеняться из-за малой концентрации паров и при охлаждении конденсируются, давая обильный белый дым.

Таким образом, горение древесины обычно начинается с тления – воспламенения углей обугленного слоя (а не воспламенения горючих газов). При увеличении толщины первичного обугленного слоя до 1–3 мм и повышении температуры обугленного слоя (до 300–350°C для берёзы и 350–400°C для сосны) поверхность углей самовоспламеняется в воздухе. Это означает, что угли на поверхности вступили в реакцию окисления $C+O_2 \rightarrow CO_2$ с выделением энергии и нагревом поверхности углей до 1000–1200°C, в результате чего поверхность начинает светиться и «истлевать» (разрушаться). При этом возникает повышенный тепловой поток внутрь древесины (за счёт теплопроводности от горячей поверхности). За счёт разогрева начинается пиролиз глубинных слоёв древесины. Газообразные продукты пиролиза (так называемые летучие) либо сгорают в обугленном слое, либо выходят через холодные части поверхности древесины в виде белого дыма.

Скорость сгорания углей в режиме тления ограничивается скоростью диффузии молекул кислорода в воздухе к поверхности обугленного слоя и внутрь него (навстречу диффундирующим от поверхности молекулам углекислого газа), то есть механизм окисления в режиме тления является диффузионным (по аналогии с процессами испарения, см. раздел 4.2.2).

Если тлеющую поверхность обдуть потоком воздуха, то она начнёт разгораться. Тлеющая поверхность получает всё большее (может быть да-

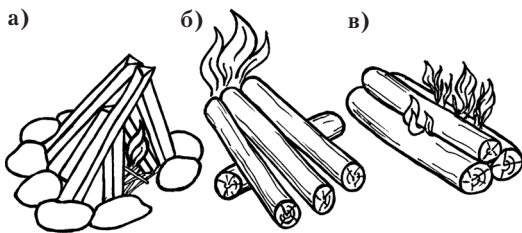
же чрезмерное) количество кислорода. Скорость потребления кислорода теперь уже ограничивается скоростью самой реакции окисления (кинетической реакции). Поэтому режим разгорания называется кинетическим. Скорость реакции окисления очень быстро (экспоненциально) растёт с температурой, так что по мере разогрева поверхности растёт темп нагрева, и реакция идёт в разгон. Скорость выхода газообразных продуктов пиролиза становится столь большой, что они уже не успевают сгореть ни внутри, ни на поверхности обугленного слоя, выходят наружу и сгорают в виде пламени (факела). Поверхность обугленного слоя целиком оказывается в атмосфере газов пиролиза, которые сплошным потоком продувают обугленную поверхность, отесняя с поверхности углей воздух. Поскольку продукты пиролиза не содержат свободного кислорода, обугленный слой перестаёт окисляться. Тем не менее, поверхность обугленного слоя остаётся раскалённой, но теперь уже не за счёт горения углей, а за счёт нагрева от пламени.

Толщина обугленного слоя постепенно увеличивается вплоть до полного преобразования полена в куски древесного угля (в угли). При этом выход газообразных продуктов пиролиза прекращается. Раскалённая поверхность древесного угля оказывается в атмосфере воздуха и начинает гореть самостоятельно, без пламени. Этот режим интенсивного горения углей внешне похож на тление, но в древнем быту назывался «жаром» в отличие от тления, которое поддерживает огонь как бы подспудно, в скрытом виде («тлеют как под пеплом головёшки»). Пламенное горение называли пылом. Горение полностью обугленного полена (крупного куса углей) происходит в диффузионном режиме, точно так же, как и в случае тления древесины. Поэтому, если подуть на горящие угли воздухом, то они начинают светиться ярче, но в отличие от тления древесины пламя, естественно, не возникает, поскольку газообразным горючим продуктам взяться уже не из чего.

Возвращаясь к углям (к обугленному слою) на поверхности тлеющей древесины, поясним, что обдув тлеющей древесины может перевести тление в пламенное горение, а может и потушить тлеющую древесину. Дело в том, что поток воздуха не только увеличивает подачу кислорода к тлеющим углям, но захлаживает сами угли за счёт конвективной составляющей теплообмена. Поэтому для надёжного перевода режима тления в режим пламенного горения необходимо плавно повышать скорость воздушного потока («раздувать» тлеющую древесину) так, чтобы температура поверхности углей непрерывно повышалась. Собственно, абсолютно такая же ситуация возникает и при «раздуве» дров, горящих пламенным горением. В любом случае при достижении кинетического режима дальнейшее увеличение концентрации кислорода уже не способ-

но ускорить реакцию окисления: необходимо повышение температуры углей. Отметим попутно, что все эти соображения объясняют и факт перехода пламенного горения в тлеющее при снижении парциального давления кислорода в топке.

Смены режимов горения дров, казалось бы, осуществляются легко. Например, в печи открыли воздухозаборные отверстия топливника – появилось пламя, прикрыли – пламя увяло, дрова стали тлеть. На самом деле ситуация более сложная. Изменение скорости подачи кислорода – это лишь одна сторона процесса, обуславливающая изменение скорости тепловыделения и, как следствие, изменение скорости пиролиза. Но скорость пиролиза (действительно являющуюся основным отличием между тлением и пламенным горением) можно регулировать не только изменением тепловыделения, но и изменением теплопотерь. Например, лежит полено и тлеет. Можно подуть в зону тления, количество кислорода у раскалённой обугленной поверхности увеличится, скорость окисления возрастёт, и бревно загорится пламенем. Но можно положить рядом с тлеющим поленом ещё одно тлеющее полено так, чтобы тепловое излучение тлеющей поверхности одного полена грело тлеющую поверхность другого полена. В таком случае теплопотери на излучение уменьшаются, температуры обугливающих слоёв обоих поленьев возрастают, и между тлеющими поленьями возникает пламя. Подобный приём используется повсеместно и называется костром (рис. 96). Выход летучих облегчается в крупных щелях поленьев и особенно брёвен при пожарах: языки пламени рвутся в первую очередь из щелей. Подогревать тлеющую поверхность можно и внешним инфраскасным источником («отражательные» панели в пламенных печах), и пламенем другого полена или другого участка полена, что в принципе и обуславливает распространение огня по дровам. Так, вертикально расположенная спичка (полено) схватывается огнём лучше, если первичное пламя расположе-



а) б) в)

Рис. 96. Костры: а – колотые поленья уложены шатром (двускатным или конусным), поджигаемые снизу лучинами, б – три бревна на общей подкладке со сближенными концами, поджигаемые вспомогательным костром или керосином, горят до 6–8 часов, в – три бревна диаметром 25–30 см, глубоко насечённые топором, уложенные отёсанными сторонами друг к другу с прокладкой из щепы и стружек от теса, разжигаемой по всей длине брёвен, горят 9–10 часов.

но снизу. Вместе с тем, в режиме увядания тления (при прекращении подачи воздуха или при охлаждении) именно щели и промежутки между поленьями становятся источниками дымления, поскольку в них дольше всего сохраняется высокая температура и высокая скорость пиролиза, хотя кислорода для сгорания горючих газов именно в них в первую очередь уже не хватает. Поэтому дольше всего дымят при тлении глубоко «изъеденные» расщелины (трещины) в обугленном слое древесины (обычно расположенные поперёк полена), причём дымление происходит белым дымом и чёрным (чадом) одновременно. Особенно долго дымят так называемые «головёшки» – витиеватые сучки древесины.

Переход от интенсивного пламенного горения к тлению часто происходит отнюдь не просто: при сокращении скорости подачи воздуха в печь, пламя вовсе не увядает, переходя в тление, а наоборот, сначала неожиданно удлиняется, языки пламени «растут», охватывая весь топливник и «залезая» даже в дымоход. Пламя начинает «реветь», возникает обманчивое ощущение огромной мощности пламени. Печь «трясётся от огня», но стенки печи при этом вовсе не разогреваются, а остывают, поскольку мощность тепловыделения всё-таки определяется скоростью подачи воздуха. Причина явления в том, что массивные долго остывающие поленья продолжают выделять горючие газы, но те из-за нехватки кислорода не могут быстро сгореть, «мечутся» по топливнику в те стороны, куда ещё проникает (или сохраняется) кислород (за счёт воспаленней случайно образующихся горючих смесей).

При наблюдениях за работой печей часто возникает вопрос, почему цвет пламени не столь уж сильно зависит от количества подаваемого воздуха. Казалось бы, сажистые частицы должны были бы гореть (светиться) при полностью открытых заслонках печи значительно ярче, вплоть до белого цвета (впрочем, также и угли). Ну, во-первых, чем меньше размер горячей в воздухе частицы, тем меньше её температура может отличаться от температуры воздуха. Это закон природы, следующий из уравнения теплопроводности для частицы, горячей в воздухе. Поэтому горящие сажистые частицы, имея размеры 1 мкм и меньше, всегда имеют точно такую же температуру, как и окружающий их газ. Если мелкие частицы, не успев сгореть в пламени, попадают в холодный воздух, то тотчас охлаждаются, поликонденсируются и превращаются в чёрный дым (или сизый дымок). А вот крупные частицы могут сильно отличаться по температуре от окружающей газовой среды, могут ярко и долго гореть даже в очень холодном воздухе в виде известных «горящих искр» от костра. По той же причине крупные капли душа медленно остывают в воздухе, мелкие же капли тонкораспылённого душа тотчас остывают, нагревая воздух.

Во-вторых, пламя над древесиной (так же как над парафиновой свечей) образуется в месте контакта объёма горючего газа с окружающим воздухом (в оболочке языков пламени). В зону (плёнку, слой) горения с одной стороны непрерывно диффундируют молекулы горючего газа, с другой стороны – молекулы кислорода; продукты горения (молекулы воды и двуокиси углерода) столь же непрерывно удаляются диффузией навстречу кислороду и горючему газу (А.Г. Гейдон, Спектроскопия и теория горения, М.: ИЛ, 1950 г.; А.Г. Гейдон, Х.Г. Вольфгард, Пламя, его структура, излучение и температура, М.: Metallurgizdat, 1959 г.; Р.М. Фристром, А.А. Вестенберг, Структура пламени, М.: Metallurgia, 1969 г.). Не углубляясь в теорию диффузионного горения, напомним, что пламя при этом может потреблять лишь ограниченное количество кислорода, лимитируемое не кинетикой химреакции, а скоростью диффузии кислорода (определяющейся парциальным давлением кислорода в воздухе, а также температурой и давлением воздуха в топливнике). Если при изменении расхода воздуха через печь эти параметры изменяются, то только тогда изменяется и температура пламени (то есть скорость реакции и температура газа в зоне горения), а значит, и цвет излучения сажистых частиц, имеющих ту же температуру, что и газ.

Если факт появления сажистых частиц обусловлен плохим смешением, то цвет их свечения и степень дымления особенно сильно изменяются при нехватке кислорода. Действительно, стехиометрический режим характерен именно тем, что в результате горения в топке потребляется абсолютно весь кислород. Но это же значит, что на заключительных стадиях горения и диффундировать в зону горения практически нечему. Это ведёт к росту времён сгорания (с удлинением пламен и появлением дымления) и к «разбуханию» (диффузионному) языков пламени. Поэтому, когда мы погружаем в пламя парафиновой свечи металлическую чайную ложку, то снижение температуры пламени и появление дымления обусловлено не только прямым контактным охлаждением, но и ограничением поступления кислорода в пламя.

В заключение отметим, что понятия температур воспламенения и самовоспламенения древесины весьма неопределены и даже более условны, чем в случае жидкостей, поскольку при воспламенении древесины мы имеем дело со взаимодействием воздуха сразу с тремя фазами: твёрдой, жидкой и газообразной. Наиболее простой случай для анализа явлений воспламенений – смесь горючего газа с воздухом. Для каждого горючего газа имеется вполне определённая область концентрации газа в воздухе, когда смесь может воспламениться. Эта область концентрации называется концентрационными пределами распространения пламени (КПР по ГОСТ 12.1.044-89) или, как говорили раньше, концентра-

ционными пределами воспламенения (КПВ). Если концентрация (содержание) горючего газа в смеси ниже нижнего концентрационного предела воспламенения (взрываемости) НКПВ, то смесь не может воспламениться (с выделением пламени и с существенным повышением температуры). В концентрационных пределах воспламенения смесь самопроизвольно вспыхивает при определённой температуре самовоспламенения (как в дизеле). Температуры воспламенения (то есть такой температуры, при которой смесь можно зажечь внешним поджигающим устройством) как таковой нет (вернее, она очень низкая) – достаточно нагреть внешним высокотемпературным источником некую минимальную зону смеси до температуры самовоспламенения. Для ориентировки укажем, что НКПВ для нафталина составляет 0,44% об., для бензола 1,43% об., для водорода 4,09% об., окиси углерода 12,5% об., генераторного газа (синтез-газа) 20,0% об., скипидара 0,73% об. Температуры самовоспламенения могут быть весьма низкими: наименьшие значения у кислородосодержащих углеводородов – эфиров 160–200°С, спиртов 200–300°С, скипидара 300°С. Ясно, что основной преградой к воспламенению горючих газов пиролиза древесины (с появлением пламени) является их низкая концентрация в воздухе над древесиной. Причём воспламеняются в первую очередь сложные соединения, но отнюдь не водород и окись углерода.

У горючих жидкостей в соответствии с ГОСТ 12.1.004-76 различают температуру вспышки (при которой над поверхностью жидкости достигается НКПВ паров и возможна кратковременная вспышка от внешнего источника зажигания, но поддержание горения оказывается в дальнейшем невозможным из-за малой скорости поступления паров из жидкости в воздух), температуру воспламенения (при которой пары воспламеняются от внешнего источника и продолжают гореть) и температуру самовоспламенения (при которой пары воспламеняются и горят самостоятельно без внешнего источника воспламенения). Температуры вспышки очень низки и составляют $T_{всп} = 0,736T_{кип}$ (эмпирическая формула Орманди-Грэвена), где $T_{всп}$ и $T_{кип}$ – температуры вспышки и кипения жидкости в градусах Кельвина $T = 273 + t$, где t в градусах Цельсия. Так, температура вспышки скипидара всего 34°С, но никаких вспышек паров над тёплой древесиной от внешнего источника (например, спички) никогда не наблюдалось. Это означает, что скипидар в древесине находится в соединениях, разрушающихся лишь при пиролизе.

У горючей же древесины обычно различают температуру воспламенения летучих (газообразных продуктов пиролиза) и температуру самовоспламенения обугленного слоя (твёрдых продуктов пиролиза). Температура самовоспламенения летучих интереса не представляет, так как

температура самовоспламенения угля обычно ниже температуры самовоспламенения летучих. Считается, что температура воспламенения летучих (газообразных продуктов пиролиза) составляет 270–300°C в том смысле, что при нагреве древесины до такой температуры можно добиться по крайней мере кратковременной вспышки газообразных продуктов пиролиза от внешнего источника зажигания. Температура самовоспламенения обугленного слоя (и фактически древесины, поскольку древесина при температурах самовоспламенения уже имеет обугленный слой), более информативна, поскольку определяет пожарную опасность древесины как конструкционного материала и лёгкость зажигания древесины как топлива. Считается, что древесный уголь древесины разных пород самовоспламеняется на воздухе при 300–470°C, однако при очень длительном нагреве древесины в связи с возможностью образования ультрамелкой сажи на поверхности древесины (пирофорного угля) может наблюдаться самовоспламенение уже при 140°C. Так или иначе, финские специалисты полагают, что деревянные потолки в саунах в принципе способны самовоспламениться при 140°C (при поддержании сухой сауны в квартире в разогретом виде, может быть, и годами). Поэтому на электрокаменках рекомендуется устанавливать термовыключатели, срабатывающие при температурах потолка 140°C. Что касается пожарников, то они в нашей стране полагают, что температуры самовоспламенения древесины превышают 320°C, в связи с чем максимальная температура внешних поверхностей металлических печей по НПБ 252-98 установлена 320°C (в помещениях с временным пребыванием людей).

5.7. Дровяные печи

Понятие «печи» в современном русском языке стало не вполне определённым (так же как и понятие «бани»). Так, в древности под печью понимали (в отличие от костра) не просто огонь, а то тепло, которое сохранялось в камне (кирпичах, глине) после прогорания огня. Русская печь грела и пекла не во время горения огня, а после. Печёная еда – это не жаренная на огне или углях и не варёная в кастрюле на кухонной плите, а приготовленная при помощи лучистого тепла от раскалённого свода печи. Фактически можно сказать, что и в чёрной бане люди «пекутся» на «вольном жаре» от раскалённых валунов, стен и потолков.

Сейчас же печами называют и отопительно-варочные печи (металлические и кирпичные, с духовками и без духовок), и промышленные технологические (доменные, мартеновские, тигельные, муфельные, конвертерные и т. п.), обогреваемые и дровами, и углём, и мазутом, и газом,

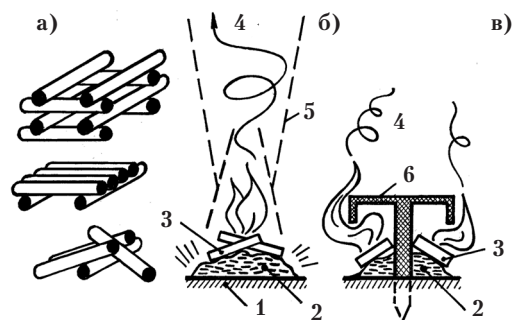
и электричеством, и даже солнечным излучением. Понятие печи сейчас непосредственно примыкает к понятиям нагревателей и теплогенераторов при отсутствии чётких критериев разграничения. Так, в промышленности печными агрегатами называют обычно аппараты с кирпичной или иной огнеупорной кладкой. Порой печами называют даже чугунные котлы, хотя под печами в СНиП 41-01-2003 невянятно подразумевают только теплоёмкие печи, требующие не более 2 топок в сутки. В быту же люди однозначно называют самые обычные «буржуйки» тоже печами. Техническая инвентаризация зданий понимает под печным отоплением децентрализованный обогрев каждого помещения (одного, двух или, в крайнем случае, трёх) индивидуальным местным нагревателем на твёрдом топливе (в отличие от центрального обогрева всего здания единым отопительным агрегатом в здании или в населённом пункте). Пожарники в НПБ 252-98 под печью понимают любое устройство, в котором горит топливо и выделяется тепло для отопления или иных целей. В английском техническом языке достаточно чётко отличают печи (очаги, горны) в смысле «топки» (furnace), кирпичные печи кухонные и отопительные (stove), нагревающие (heater), обжигающие (kiln), хлебные (oven) и т. п.

5.7.1. Устройства для сжигания дров

Простейшим обогревающим устройством является костёр, представляющий собой совокупность двух или более поленьев, греющих друг друга. Костёр является величайшим изобретением человечества. Чёрные (курные) бани – это фактически сочетание костра и воды.

Пустоты между поленьями костра практически представляют собой множество микротопок с горящими деревянными «стенками». Скорость горения «стенок» может целенаправленно изменяться подбором размера и порядком укладки поленьев, их шуровкой, увлажнением, продувкой воздуха и т. п. В этом отличие костров от лесных и бытовых пожаров, которые «управляемы» весьма условно (в части тушения). Но, конечно, теория локальных костров лежит в основе теории распространяющихся пожаров.

Первичными отличиями костра от полена являются: во-первых, возможность подогрева поленьев (для сушки, воспламенения и горения) другими уже горящими поленьями и во-вторых, возможно затруднённый доступ кислорода к месту горения. Если воздух подавать во все промежутки между поленьями в достаточном количестве, то пламя костра низкое (сосредоточено в закладке дров). Но если воздуха в закладке дров не хватает, то летучие продукты пиролиза вырываются из межполеньевых промежутков и догорают над костром в виде «столба огня».



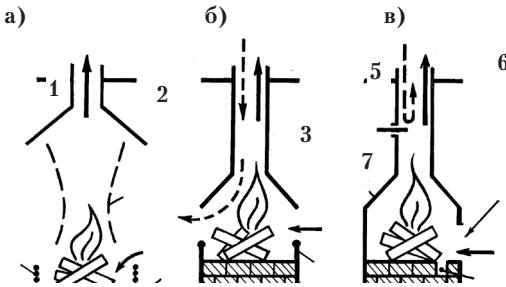
сажа), 5 – геометрия тепловой конвективной струи (столба пламени и дымовых газов), 6 – металлический навес-грибок.

Рис. 97. Костры с повышенной лучистой теплоотдачей: а – рыхлая укладка поленьев, б – подкладка поленьев на горящие угли, в – костёр с подкладкой дров с металлическим навесом-гасителем высоты пламени и отражателем теплового излучения. 1 – основание (грунт, огнестойкая площадка), 2 – горящие угли, 3 – постоянно подкладываемые поленья, 4 – дым (копоть,

Костёр согревает людей за счёт лучистого тепла от горящих углей и от раскалённых сажистых частиц (пламени). Горячие дымовые газы (продукты сгорания) поднимаются вверх и не оказывают влияния на человека, если только не нагревают, скажем, потолок или радиационную панель (жаровню). Ясно, что если огонь разводится в нижней зоне толстого слоя дров, то пламя фактически «завалено» поленьями, которые вначале долго дымят «белым дымом», поглощая всё тепло источника горения. Если же огонь разводится поверх дров, то пламя и угли с самого начала эффективно прогревают стены помещения лучистым потоком и к тому же подавляют дымление за счёт сгорания сажи в пламени. Это означает, что костры в помещениях целесообразно поддерживать постоянным подбрасыванием мелких поленьев на кучу раскалённых углей. Чтобы горящие поленья грели друг друга и в то же время выпускали из костра побольше лучистого тепла, применяют рыхлые укладки поленьев (рис. 97а), но это затрудняет распространение пламени.

Языки пламени – это контуры потоков горючих продуктов пиролиза, визуальнo очерченные поверхностными оболочками зон горения. Эти языки пламени устремляются вверх (порой отрываясь), объединяются в единую ускоряющуюся струю огня, переходящую в столб дыма, выполняющий роль дымовой трубы для создания тяги.

Столб дымовых газов постепенно взвихривается и приобретает обычную форму расширяющейся затопленной струи (рис. 52). При этом на больших высотах столб дымовых газов ведёт себя точно так же, как струя над любым тепловым источником той же мощности. Под мощностью при этом имеется в виду мощность конвективной струи, в случае костра равная общей мощности горения минус теплопотери на излучение. То есть, чем больше будут лучистые потери (от углей и пламени), нагревающие людей, чем больше тепла мы отберём от костра или пламе-



для повышения лучистого потока, 3 – металлический навес-ограждение, 4 – металлическая бочка без дна, 5 – отверстие в верхнем торце бочки, 6 – подъемное устройство для поднимания бочки после окончания пламенного горения, 7 – воздухозаборное отверстие.

Рис. 98. Открытые очаги: а – ограждённая бетонная или кирпичная площадка, б – площадка с ограждением-навесом из согнутого листа металла, в – площадка с ограждением в виде металлической бочки, открытой сверху. 1 – металлический лист-жаровня, подвешенный над пламенем для повышения лучистого потока, 2 – цепи, опущенные в пламя,

ни, тем холодней будут дымовые газы, тем меньше будет тяга, но тем более безопасным станет костёр как источник столба горячих газов, к тому имеющих внутри себя «искры» – крупные горящие частицы древесины и сажи. При этом охлаждение именно дымовых газов (то есть смеси продуктов сгорания с избыточными количествами воздуха) вовсе не означает непременно снижение температуры горения горючих газов пиролиза (оболочек – контуров пламени) с появлением чёрного дыма. Зоны горения всегда горячее дымовых газов и охладить их можно лишь нехваткой воздуха для горения (см. ниже). Поэтому размещая в зоне пламени теплоёмкие элементы, мы снижаем температуру дымовых газов точно так же, как кастрюля на газовой плите снижает нагрев кухонного помещения от горячих потоков сгоревшего газа. Точно такой же эффект охлаждения дымовых газов будут оказывать и малотеплоёмкие сильно-разогревающиеся в пламени элементы (в частности, сажистые частицы), но уже за счёт собственного излучения. Так, например, металлический зонтик-грибок, защищающий костёр от дождя, нагреваясь, может выполнять роль жаровни, отводящей тепло из зоны пламени за счёт своего инфракрасного излучения (рис. 97в).

В помещениях костры разжигались на специальных огнестойких ложках, называвшихся у греков и римлян каминами, у славян – топками, у турок – очагами и т. д. Чаще всего это были каменные (кирпичные) площадки с ограждениями (рис. 98). Впоследствии огонь стали ограничивать сводами, называвшимися у римлян камерами, а у славян печами. После прогорания огня в теплоёмкой печи можно было печь еду (хлеб, лепёшки), то есть готовить не на огне (пламени), называвшемся пылом, а на лучистом тепле (жаре от углей или «вольном тепле» от раскалённого свода) или на раскалённом поде (или своде).

Огнестойкие ложа для огня изготавливались и в виде переносных жаровен, например, тачек или носилок на ножках, футерованных кирпичом, или крупных металлических (или глиняных) поддонов (ящичков) на ножках, аналогичных современным мангалам, грилям, шашлычницам. Жаровни могли огораживаться с боков и сверху металлическими листами, также называемыми жаровнями (грилями), которые, нагревшись, испускали добавочное лучистое тепло. Иногда переносные жаровни разжигались на открытом воздухе и вносились в помещение, когда в них оставались одни угли (и/или раскаленные камни).

Дымовые газы из открытых очагов выводились через отверстия в потолках, расположенных либо непосредственно над очагом (как в чумах, юртах, лаконикумах и т. п.), либо со сдвигом, когда дымовые газы растекаются по потолку и выходят через дымник в потолке и волоковое отверстие сверху стен. Для предотвращения загрязнений и пожаров в XII веке в Европе стали использовать вытяжные зонты 4 (рис. 99а), давшие жизнь современным каминам. Такие зонты стали первыми прообразами дымовых труб. Так, нетрудно заметить, что русская подовая печь представляет собой камеру (горнило) с одним отверстием (жерлом для закладки дров и вывода дыма), над которым смонтирован кирпичный зонт.

Высокорасположенные вытяжные зонты должны иметь высокую производительность по дымовым газам 10, поскольку горячая конвективная струя дымовых газов над костром турбулентно подсасывает большие массы холодного незадымленного воздуха (в сотни раз превышающие количество исходных дымовых газов), и всю эту массу смеси необходимо вывести в атмосферу (см. рис. 52). Однако, увеличение диаметра вытяжного воздуховода приводит к появлению нисходящих

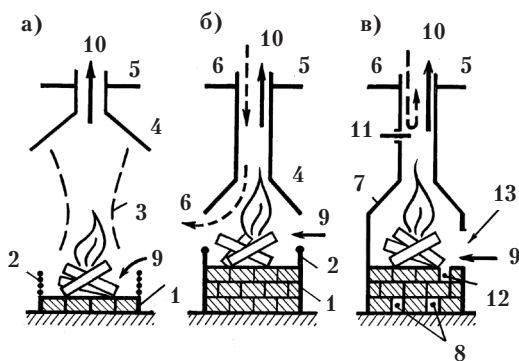


Рис. 99. Вытяжные зонты над открытыми очагами: а – высоко-расположенный зонт, б – низко-расположенный зонт, в – зонт каминного типа. 1 – огнестойкая площадка, платформа (очаг), 2 – ограждение очага, 3 – траектория дымовой струи, 4 – вытяжной зонт металлический, 5 – потолок, крыша, перекрытие, 6 – нисходящий поток холодного воздуха, проникающий в вытяжную (дымовую) трубу сверху, 7 – зонт, охватывающий весь очаг (обечайка), 8 – продухи (шанцы), 9 – подача воздуха для горения дров, 10 – дымовые газы, 11 – карниз, задвижка, 12 – прямок для сбора золы, 13 – топочный проём.

1 – огнестойкая площадка, платформа (очаг), 2 – ограждение очага, 3 – траектория дымовой струи, 4 – вытяжной зонт металлический, 5 – потолок, крыша, перекрытие, 6 – нисходящий поток холодного воздуха, проникающий в вытяжную (дымовую) трубу сверху, 7 – зонт, охватывающий весь очаг (обечайка), 8 – продухи (шанцы), 9 – подача воздуха для горения дров, 10 – дымовые газы, 11 – карниз, задвижка, 12 – прямок для сбора золы, 13 – топочный проём.

потоков холодного воздуха 6, просто-напросто «утопающих» в тёплом воздухе 10 и разносящих дым по всему помещению. Поэтому вытяжной зонт с целью повышения тяги (за счёт снижения количества подсасываемого воздуха) целесообразно опускать пониже (рис. 99б) и даже совмещать с охватывающей обечайкой 7 (рис. 98в и рис. 99в). Такие решения уже непосредственно смыкаются с конструкциями каминов (рис. 100). Так же как в каминах, в вытяжных воздуховодах низко опущенных зонтов бывают целесообразными карнизы 11 в виде задвижек или «дымовых зубов», расположенных у стенки воздуховода, наиболее удалённой от топочного проёма 13. Карниз 11 стимулирует, во-первых, спуск нисходящих потоков холодного воздуха 6 именно в этой зоне и, во-вторых, предотвращает около себя постоянное метание (колыхание из стороны в сторону) восходящего потока дымовых газов. В результате, восходящий поток дымовых газов 10 упорядоченно подхватывает разворачивающийся поток холодных нисходящих масс воздуха 6 (рис. 99в).

Характер движения газов в холодных дымовых трубах может быть весьма сложным и обескураживает порой даже опытного печника. Вместе с тем струи газа в трубах ведут себя более упорядоченно, чем затопленные струи под вытяжными зонтами, особенно, если эти струи газа горячие. Горячая струя, являясь вязкой и ламинарной, ведёт себя в трубе как шнур, окружённый холодными медленно текущими (даже зачастую вниз) низковязкими турбулентными потоками. При прогреве трубы течения в ней становятся однородней.

Так же как в каминах и печах, в очагах могут изготавливаться зольники-приямки для сбора и накопления золы 12 (с перекрывающей решёткой или без, с подводом воздуха снизу как в поддувалах или без доступа воздуха, но чаще все же с плотной верхней крышкой для предотвращения дымлений и распространений пыли и запахов). В нижней части очагов могут организовываться сквозные каналы-продухи (шанцы) 8 для отвода тепла из платформы очага 1 как для обогрева воздуха, так и для предотвращения воспламенения досок пола (если очаг выкладывается на полу). Продухи под печами зародились на Руси давно, ещё в русских глинобитных печах, а в XVI веке уже широко применялись в кремлёвских кирпичных печах. В последние годы шанцы в печах стали заменять «системами нижнего прогрева», пропуская через прикрытые продухи дымовые газы.

Камины относятся к древним (допечным) типам европейских обогревательных приборов и родились в попытках «загнать» дым от костра в каменный вытяжной зонт (трубу). Нагрев помещения при этом стал осуществляться исключительно лучистым теплом от углей, пламени и разогретых стенок камина, поэтому каминные приборы обрели большую площадь

проёма и небольшую глубину топочного пространства. Задние стенки стали делать усиленно прогреваемыми (наклонными). Каминны имеют низкий коэффициент полезного действия не выше 0,2 и большой коэффициент избытка воздуха на уровне 30, вследствие чего температура вытяжных газов (смеси дыма и воздуха, подсасываемого через проём каминна непосредственно в дымовую трубу) не превышает 100°C (см. например, В.М.Колеватов, Печи и каминны, СПб.: Диамант, 1997 г.). Тяга вытяжных труб каминнов высотой Н составляет при таких температурах $\Delta p(\text{Па})=2,5Н(\text{м})$, то есть низка и сопоставима с тягой при вентилировании бань. Поэтому топка каминна в ветренную погоду может повлечь опрокидывание тяги.

Для вывода больших объемов вытяжных газов (порядка 150 м³/час при непрерывном сжигании дров 1 кг/час и при полезной мощности каминна 0,8 кВт) требуются большие поперечные сечения вытяжной трубы. Так, нормы пожарной безопасности НПБ 252-98 требуют (и, как многие считают, не обоснованно), чтобы скорость в дымовых каналах находилась в пределах от 0,15 до 0,6 м/сек. Это значит, что сечение дымовой трубы даже маломощного каминна должно составлять 0,1 м². Столь большие сечения на практике никогда не встречаются (см. таблицу 17).

Таблица 17

Стандартные размеры бытовых каминнов (в см)

(Ю.П. Соснин, Е.Н. Бухаркин, Отопление и горячее водоснабжение индивидуального дома, М.: Стройиздат, 1991 г.)

Площадь помещения, м ²	Портал		Топливник	Сечение дымохода
	ширина	высота	глубина	
12	50	45	30	14×14
16	60	50	32	14×27
22	70	56	35	14×27
30	80	60	37	27×27
35	90	70	40	27×27
40	100	75	45	27×27

Каминны с вытяжными трубами (дымоходами) поперечным проходным сечением «в полкирпича» сейчас на дачах уже не применяют, поскольку они дымят при растопке. Сечение вытяжной трубы (высотой порядка 5 м) обычно выбирают величиной не менее одной седьмой от площади проёма портала (или одной десятой в случае строго вертикальной гладкой металлической трубы). В аэродинамическом отношении основным недостатком каминнов английского типа

(рис. 100а) является возможность появления дымления из проёма портала (топочного отверстия) на этапе растопки при холодной трубе. Этот недостаток устраняется не только дымовым зубом (уступом, карнизом) 2, но и специальной дымовой камерой - системой свободных проточных емкостей большого объема до и после дымового зуба. Начальный дым, поднимаясь в такие крупные емкости, охлаждается холодными стенками не так сильно, как в узкой вытяжной трубе, накапливается и создает начальный импульс тяги. Кроме того в быту часто прибегают к временной установке на этапе разгорания огня заслонки (штор) на портал - металлических щитков, сеток, цепей в проёме камина или, по крайней мере, в верхней части проёма. В последние годы стали широко применять заслонки в проёме в виде стеклянных дверок, распахивающихся или сдвигающихся (рис. 100в). Стёкла подбирают термостойкими (кварцевыми, боросиликатными-увиолевыми) и максимально прозрачными в инфракрасной области спектра. Камин может быть оборудован также колосниковой решёткой и поддувалом, что ещё больше приближает схему (рис. 100в) к печной конструкции. Для повы-

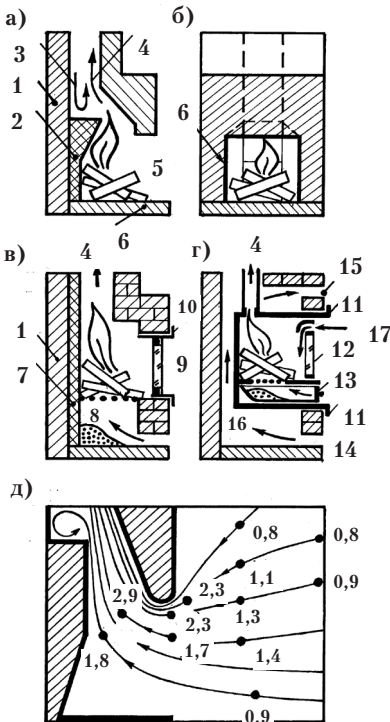


Рис. 100. Каминь: а – английский камин (вид сбоку), б – английский камин (вид спереди), в – современный камин застеклённый с поддувалом, г – чугунный камин-сердцевина застеклённый с конвективным контуром, д – траектории входа воздуха в английский камин (цифры в точках – линейные скорости воздуха в м/сек). 1 – несгораемая стена, 2 – огнестойкая кладка с дымовым зубом, 3 – нисходящий поток в дымоходе, 4 – основной (восходящий) поток дымовых газов, 5 – проём камина (топочное отверстие), 6 – декоративное обрамление проёма (портал), 7 – огнестойкая кладка, 8 – зольник с колосниковой решёткой и поддувалом, 9 – термостойкое (боросиликатное) стекло, 10 – каркас-рама с застеклёнными дверками, 11 – корпус литого чугуна камина-сердцевины, 12 – стеклянные дверцы, 13 – зольная коробка с поддувальным отверстием, образующимся при выдвигении вперёд коробки, 14 – приточное отверстие для ввода холодного воздуха в конвективно-калориферную систему, 15 – отверстие для вывода нагретого воздуха, 16 – конвективный поток воздуха, 17 – система распределённой подачи воздуха для обдува стеклянного окна в целях предупреждения осаждения сажи.

шения коэффициента полезного действия, стенки камина стали делать прогреваемыми и обдуваемыми снаружи. Наиболее эффективно сделать это с применением металлического корпуса (рис. 100г), часто называемого кассетой или каминой-сердцевиной. Такой чугунный или стальной корпус («еврокамин») можно вмонтировать в кирпичный, бетонный, каменный или даже гипсокартонный (огнезащищенный со стороны кассеты минватой) декоративный кожух (В.Н. Глухих, Каминь, СПб.: Профикс, 2003 г.; Ш.К. Афанасьев, Каминь. Современный взгляд, М.: Аделант, 2006 г.). В настоящее время каминь воспринимаются, скорее, как декоративные очаги эпизодического использования, создающие уют от вида огня.

Если каминь использовались скорее для отопления, то в печах уже можно было готовить пищу. Печи представляют собой герметично огороженные со всех сторон (глинобитными, кирпичными, каменными, металлическими стенками) топки, имеющие специальные отверстия для закладки дров, ввода воздуха и вывода дыма. Первые печи имели круглую куполообразную глинобитную топку и всего одно отверстие – устье (жерло), через которое закладывали дрова и выводили дым в помещение (А.И. Орлов, Русская отопительно-вентиляционная техника, М.: Строи-

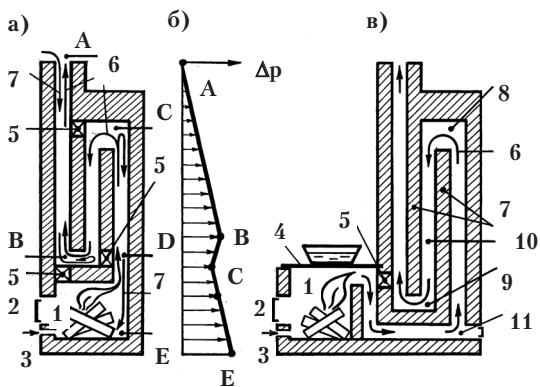


Рис. 101. Печи: а – отопительная печь («голландка») с вертикальными дымооборотами, б – эюра разницы статических давлений вне печи и внутри печи (разрежения) при отсутствии потока дымовых газов при закрытом поддувале (буквы соответствуют месторасположению реперных точек на левой схеме печи, стрелки указывают, что воздух всюду «всасывается» в печь при закрытом поддувале), в – отопительно-варочная печь («шведка»)

с обогревательным щитком с вертикальными дымооборотами. 1 – топливник (камера сгорания, топка), 2 – дверка (крышка, заслонка) проёма (жерла) для закладки дров, 3 – воздухозаборное отверстие с заслонкой (задвижкой, затычкой), 4 – металлическая плита (чугунная, стальная) теплообменная (варочная), 5 – возможные местоположения растопочных задвижек (летних дымоходов), 6 – основной поток дымовых газов, 7 – внутренние стенки дымооборотов (рассечки), 8 – верхнее отверстие в рассечке – перевал, 9 – нижнее отверстие в рассечке – подвертка, 10 – нисходящий дымовой канал, часто состоящий из нескольких каналов для уменьшения сопротивления, 11 – нижний канал, очень ценный тем, что в нём скапливается основная доля сажи и конденсатных спёков (в то же время его легко очистить), 12 – нисходящий поток тяжёлого холодного воздуха в дымовой трубе.

издат, 1950 г.). Такие печи были известны в германских племенах еще в VII веке как кухонные и назывались как-то типа «бак» или «баг» (*backen* нем., *bage* дат., *baka* швед., *bake* норв. - во всех языках «запекать еду»), а затем были занесены варягами в Новгород («багровые» - раскаленные до красна) и, видимо, дали название отопляемым курным срубам - избам («избаг» - то, что вокруг печи по аналогии с «изгородью»).

Затем топку (горнило) в печи стали делать тоннельной – арочной (углублённой), а над открытым устьем стали устанавливать вертикальную вытяжную трубу (дымник, впоследствии оборудованный расширением-зонтом), выводящую продукты сгорания в атмосферу, минуя помещение.

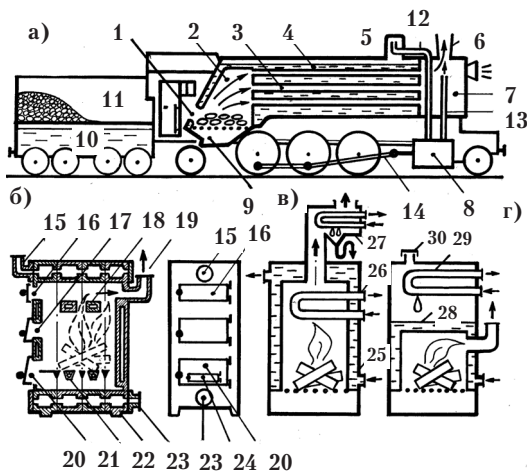


Рис. 102. Котлы: а – котёл паровой машины на примере паровоза, б – бытовой водогрейный котёл отопительный, набранный из отдельных литых чугунных секций, стянутых шпильками (вид сбоку в разрезе и вид спереди), в – двухконтурный котёл бытовой стальной (с возможным подключением конденсатора-теплообменника, конденсирующего пары воды из дымовых газов), г – котёл водогрейный с промежуточным теплоносителем конденсационный. 1 – дверка топки, 2 – топка чугунная водоохлаждаемая (огневая коробка), 3 – кожухотрубный теплообменник (жаровые трубы), 4 – поверхность кипящей воды, 5 – брызгоотделитель (сухопарник), 6 – дымовая труба, 7 – дымовая коробка, 8 – паровая машина (цилиндр, поршень, золотник), 9 – зольник (многобункерный ящик) для сбора и накопления шлака с колосниковой решёткой и поддувальными отверстиями, 10 – тендерная ёмкость с запасом воды, 11 – тендерный ящик с запасом угля, 12 – паровая магистраль, 13 – выброс отработанного пара с увеличением тяги топочных газов, 14 – кривошипно-шатунный механизм (поршни, ползунки, шатуны, дышла ведущие и сцепные, колёсные пары), 15 – патрубок вывода горячей воды, 16 – дверка для прочистки дымохода, 17 – дверка для загрузки твёрдого топлива (дров, угля), 18 – дополнительные теплообменные трубы (перемычки чугунных секций), 19 – дымовой канал (дымоход), 20 – комбинированная дверка для розжига топлива, чистки и подачи воздуха, 21 – поддувальная решётка с водоохлаждаемыми и неохлаждаемыми колосниками, 22 – наборные чугунные секции, 23 – патрубок ввода холодной воды, 24 – дверка дополнительная для подачи воздуха, чистки зольника и шуровки колосниковой решётки, 25 – водоохлаждаемый корпус, 26 – трубчатый теплосъёмный элемент, 27 – конденсирующее устройство для рекуперации тепла, 28 – поверхность кипящей воды, 29 – трубчатый конденсатор – нагреватель воды, 30 – предохранительный клапан.

лообменник (жаровые трубы), 4 – поверхность кипящей воды, 5 – брызгоотделитель (сухопарник), 6 – дымовая труба, 7 – дымовая коробка, 8 – паровая машина (цилиндр, поршень, золотник), 9 – зольник (многобункерный ящик) для сбора и накопления шлака с колосниковой решёткой и поддувальными отверстиями, 10 – тендерная ёмкость с запасом воды, 11 – тендерный ящик с запасом угля, 12 – паровая магистраль, 13 – выброс отработанного пара с увеличением тяги топочных газов, 14 – кривошипно-шатунный механизм (поршни, ползунки, шатуны, дышла ведущие и сцепные, колёсные пары), 15 – патрубок вывода горячей воды, 16 – дверка для прочистки дымохода, 17 – дверка для загрузки твёрдого топлива (дров, угля), 18 – дополнительные теплообменные трубы (перемычки чугунных секций), 19 – дымовой канал (дымоход), 20 – комбинированная дверка для розжига топлива, чистки и подачи воздуха, 21 – поддувальная решётка с водоохлаждаемыми и неохлаждаемыми колосниками, 22 – наборные чугунные секции, 23 – патрубок ввода холодной воды, 24 – дверка дополнительная для подачи воздуха, чистки зольника и шуровки колосниковой решётки, 25 – водоохлаждаемый корпус, 26 – трубчатый теплосъёмный элемент, 27 – конденсирующее устройство для рекуперации тепла, 28 – поверхность кипящей воды, 29 – трубчатый конденсатор – нагреватель воды, 30 – предохранительный клапан.

Такие «белые» печи были распространены в Центральной Европе ещё в XI веке, но до XX века сохранились только в России (благодаря наличию лежанки и из-за отсутствия в деревнях металлической посуды) и стали называться «русскими» (духовыми).

Русские печи топилась разжиганием огня (костра) на глухом поде при открытом устье печи, поэтому подсасывали (как и камин) в дымовую трубу большие избыточные массы воздуха. Впоследствии входные проёмы печей стали прикрываться листовой железной заслонкой. В результате дозирования воздуха в топливнике появилось разрежение за счет тяги дымовой трубы, что позволило создать дымооборотные печи.

Отопительные печи с дымооборотами в народном жаргоне стали условно называться «голландками» в память об изобретённых в Голландии в XV веке канальных печах, которые (в отличие от ранее использовавшихся каминов и печей русского типа) могли многократно возвращать дым вниз по многооборотным дымоходам. «Голландки» были неудобны в крестьянском быту («ни лечь, ни спечь») и считались барскими (усадебными). В отличие от отопительных «голландок» отопительно-варочные печи с плитами и дымооборотами были условно названы в народе «шведками» (рис. 101).

Логическим развитием кирпичных печей стало появление металлических печей. Мощнейший толчок этому направлению дали топки паровых котлов высокого давления (для паровых двигателей в промышленности, в судостроении, в железнодорожном транспорте), а затем водогрейных котлов для централизованного отопления зданий (рис. 102).

5.7.2. Особенности сжигания дров в печи

Теория топочных процессов включает вопросы газодинамики струй и течений, кинетики химических реакций горения, теплообмена с поверхностями топки и каналов (Г.Ф. Кнорре, Топочные процессы, М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959 г.; М.А. Глинков, Основы общей теории печей, М.: Металлургиздат, 1962 г.). Многочисленность факторов делает оптимизацию топок весьма сложной задачей даже для специалистов.

Настоящая книга не ставит задач по анализу и систематизации тех миллиардов различных конкретных конструкций печных устройств, которые были разработаны человечеством в ходе эволюции, тем более, что толковому печнику психологически и технически проще придумать сотню новых конструкций, чем довести одну-единственную (А.И. Рязанкин, Секреты печного мастерства, М.: Народное творчество, 2004 г.). Мы остановимся только на одном, но самом главном, с нашей

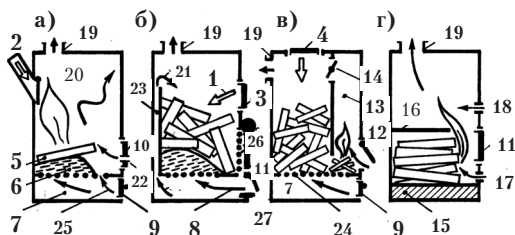


Рис. 103. Типы печей: а – печь с верхним горением дров, б – печь с нижним горением дров, в – печь с нижним горением, поджигаемая с помощью вспомогательной топки, г – печь с передним (боковым) горением. 1 – способы загрузки дров (белые стрелки), 2 – бункер с клапаном-мигалкой

для подачи дров, 3 – люк с дверкой для подачи дров, 4 – люк с крышкой для подачи дров, 5 – полено, 6 – угли, 7 – зольник (поддувало), 8 – направление движения воздуха из поддувального отверстия в решётку, 9 – дверка зольника с поддувальным отверстием, 10 – дверка топки для загрузки дров и ворошения дров и углей (шуровка), 11 – дверка комбинированная, 12 – дверка вспомогательной топки для загрузки и розжига растопки, 13 – вспомогательная топка для начального разведения огня, 14 – клапан для вывода дымовых газов из вспомогательной топки, 15 – огнеупорное дно (под), 16 – горизонтальный металлический лист, образующий дымооборот и камеру для закладки дров для переднего горения, 17 – воздухоподающие отверстия для первичного воздуха, 18 – воздухоподающие отверстия для вторичного воздуха, 19 – дымоход, 20 – лучистый поток, 21 – вторичный воздух, 22 – отверстие в дверке для вторичного воздуха, 23 – канал из зольника в верхнюю часть топки для подачи вторичного воздуха, 24 – решётка, 25 – поток воздуха через оголённый участок решётки (вторичный воздух), 26 – внутренняя решётчатая дверца топливника для удержания дров, 27 – люк в комбинированной дверке для подачи воздуха в поддувало и решётчатую дверцу.

точки зрения, моменте: взаимосвязи процесса горения каждого индивидуального полена с процессами работы всей печи в целом.

Дело в том, что дрова это не газ и не мазут, не угольная пыль и не древесные опилки, которые можно непрерывно подавать в топку с фиксированным расходом, сжигать их постоянным факелом и тем самым поддерживать стабильность температурных условий в зоне горения. Дрова (как и уголь) подают в топку дискретными порциями-поленьями (кусками), и каждая порция сгорает сначала с выделением газообразных продуктов пиролиза (так называемых «летучих», образующих при горении пламя), а затем остаток сгорает в виде угля (кокса) без пламени с образованием твёрдых нелетучих остатков – золы (шлака). Поленья разного размера (разного поперечного сечения) горят по-разному. Тонкие поленья (спички, щепка, лучина) могут гореть самостоятельно в одиночку в холодной топке, и поэтому используются как растопка. Но крупное полено-бревно в одиночку самостоятельно без внешнего подогрева не сгорит. Например, сухой вертикальный телеграфный столб, зажжённый снизу керосином, может весь обгореть, затем весь истлеть (как в Булерьяне), но пламенем (как спичка) сгореть не может. Причина в том, что тепловыделение от пламени растёт пропорционально «диаметру» полена, а затраты на про-

грев полена растут пропорционально квадрату «диаметра» полена (то есть значительно быстрее). Толстые поленья могут гореть пламенем только в костре (в закладке). Порции дров могут постепенно накладываться друг на друга, формируя установившийся режим горения. Но чаще всего используется одна-единственная порция (закладка).

В дачном быту мало кто всерьёз задаётся вопросом, как лучше закладывать в печь дрова – как ни забрось, всё равно сгорят и дадут тепло. Это раньше в подовых русских печах и особенно в открытых очагах курных изб и бань как-то старались управлять горением дров выбором породы, подбором размеров и изменением их укладки (см. раздел 5.7.1). Поэтому напомним, что дрова в топливнике (как и в костре) могут гореть верхним горением (сверху), нижним горением (снизу) и боковым (или передним).

При верхнем горении (рис. 103а) поленья забрасываются поодиночке на слой горящих углей 6 через загрузочный люк (с клапаном 2 или с дверцей 3). Одиночные поленья 5 не загораживают основную массу раскалённых углей, поэтому этот режим характеризуется мощными лучистыми потоками 20 от углей к стенкам. Такой режим очень хорош для печей всех типов, кроме кирпичных без огнеупорной кладки топливника (поскольку роль дымооборотов в этом режиме сведена к минимуму, и нагревается в основном топливник). Если воздух подаётся снизу через решётку из зольника, то весь кислород потребляется нижним горящим слоем углей. Полено 5 нагревается фактически в инертной среде, и выходящие из полена летучие претерпевают пиролиз с образованием чёрного дыма и горючих газов. Поэтому стандартная система подачи воздуха через поддувало (зольник) и решётку вовсе не является самодостаточной: необходим подвод дополнительного (так называемого «вторичного») воздуха 21 в пространство над дровами, например, , через отверстие в дверке топki 10 или через специальный канал из зольника 23.

В случае нижнего горения (рис. 103б) угли и пламя буквально завалены холодными поленьями, которые прогреваясь, дымят белым (бурым) дымом (продуктами пиролиза). Вторичный воздух 23 белого дыма не устраняет. Белое дымление ослабевает по мере того, как пламя охватывает всю закладку дров, и постепенно заменяется чёрным дымлением. Официальная процедура организации нижнего горения предусматривает розжиг растопки (лучины) на решётке, после чего через люк 3 набрасываются поленья 1 на две трети высоты топki, чтобы оставить треть высоты топki якобы для пламени. Ясно, что если пламя находится в нижней части кучи дров, то температура топливника, а тем более дымовой трубы, растёт медленно, в то время как поленья разогреваются быстро и одно за другим начинают вспыхивать. Но если температура дымовой трубы вначале мала (рис. 104а), то и расход воздуха через трубу