

Рис. 104. Качественный ход последовательных изменений параметров печи с нижним горением: а – при прогреве холодной дымовой трубы в ходе топки, б – при предварительно прогретой дымовой трубе, $T_{\text{топ}}$ – температура топки (топливника, камеры сгорания), $T_{\text{тр}}$ – температура дымовой трубы, $G_{\text{д}}$ – потребный поток воздуха (как окислителя) для полного сгорания дров, $G_{\text{тр}}$ – поток воздуха, создаваемый дымовой трубой, $\alpha = G_{\text{тр}}/G_{\text{д}}$ – коэффициент избытка воздуха.

$G_{\text{тр}}$ (а значит и через топливник) также мал, поскольку тяга создаётся за счёт высокой температуры трубы. А быстрое распространение огня вверх по закладке дров означает, что потребное количество воздуха для горения дров $G_{\text{д}}$ быстро растёт (рис. 104б). В результате коэффициент избытка воздуха $\alpha = G_{\text{тр}}/G_{\text{д}}$ в начальных этапах топки мал (рис. 104б), а это свидетельствует о недогаре летучих, иными словами, о дымлении. В конце топки труба уже прогрелась, а угли, оставшиеся от кучи дров, начинают догорать и требуют всё меньше воздуха. Это значит, что коэффициент избытка воздуха в конце топки намного больше единицы и дымление отсутствует.

Задача оптимизации печей заключается в стремлении к стехиометрическому режиму горения $\alpha=1$ хотя бы на период наиболее интенсивного горения дров. Это может быть достигнуто применением низкотеплоёмких быстронагреваемых (утеплённых) дымовых труб или предварительно прогреваемых (например, зимой за счёт тепла помещения). Определённой оптимизации можно добиться разумным регулированием подачи воздуха в процессе прогорания дров. Но в том-то и дело, что режим нижнего горения нравится населению именно тем, что ничего не надо регулировать – загрузил дрова и всё. Оптимально ли горение или нет, хватает ли воздуха или нет, есть ли дымление или нет – это рядового дачника не волнует, он даже порой в печь лишний раз не заглянет.

Режим нижнего горения рекомендуется для единичных разовых протопок многими организациями: и всеми финскими банными фирмами, и разработчиками бытовых отопительных печей шахтного типа



Рис. 105. Зависимость расчётной температуры продуктов сгорания древесины (дымовых газов) от влажности дров при различных коэффициентах избытка воздуха, указанных цифрами у кривых.

нять коэффициент полезного действия до 70%, в то время как подовые печи имеют коэффициент полезного действия не более 35% (А.Н. Сканиви, Л.М. Махов, Отопление, М.: АСВ, 2002 г.). А колосниковые решётки как раз и рождают, к сожалению, радужные настроения в пользу нижнего горения толстых слоёв топлива.

На самом деле коэффициент полезного действия даже русских подовых печей может превышать 70% (Л.А. Семёнов, Журнал «Отопление и вентиляция», № 6, 12, 1941 г.), несмотря на невозможность строгого регулирования подачи воздуха заслонкой жерла. Причина пониженного коэффициента полезного действия во многих русских печах кроется вовсе не в отсутствии колосниковой решётки, а в неминуемо высоких коэффициентах избытка воздуха в условиях горения дров в печи при открытом жерле (проёме) печи, а также в отсутствии дымооборотов. Действительно, теоретическая температура продуктов сгорания дров очень сильно зависит от коэффициента избытка воздуха, причём значительно сильнее, чем от влажности древесины (рис. 105). Так, если 1 кг абсолютно сухих дров (с относительной влажностью равной нулю) сжечь строго с 4,61 м³ (5,96 кг) воздуха, то температура всей совокупности дымовых газов превысит 2000°С. Величина 4,61 м³/кг называется стехиометрическим коэффициентом для абсолютно сухой древесины по отношению к воздуху и соответствует количеству воздуха, необходимому для полного сгорания дров, то есть тому количеству воздуха, при котором в процессе горения окисляются все компоненты древесины. Если взять большее количество воздуха, то избытку воздуха (сверх 4,61 м³/кг) уже не достанется дров. Никак не будет реагировать (химически) избыток воздуха и с продуктами сгорания, просто разбавит их и тем самым снизит их температуру. Например, если взять воздуха в три раза больше, чем минимально необходимо (то есть 13,83 м³/кг), то температура продуктов сгорания составит уже не 2000°С, а всего лишь 900°С.

Если взглянуть на пламя дров, которое постоянно мечется из стороны в сторону, то становится ясным, что вполне возможна ситуация, когда в одной зоне горения временно содержится намного меньше воздуха, чем нужно для полного сгорания летучих, а в другой – временно намного больше. Надёжное сгорание в этих условиях мыслимо лишь при существенном избытке воздуха (чтобы везде воздуха хватало), но при этом температура продуктов сгорания оказывается неминусом ниже стехиометрического уровня 2000°С. Поэтому стремление повысить температуру продуктов сгорания приводит в противоречие со стремлением снизить дымность продуктов сгорания (и повысить КПД). Дымление паровозов и пароходов показывает, что топки их котлов специально работают при недостатке воздуха. Лишь для обеспечения скрытности боевые паровые суда применяли режим повышенного расхода воздуха, который дожигает летучие, но снижает температуру продуктов сгорания и мощность паровой установки. Также и в ракетных двигателях (например, ракет-носителей космической техники) коэффициент избытка окислителя выбирается меньшим единицы. Напомним, что двукратное снижение коэффициента избытка воздуха с 1,0 до 0,5 приведёт примерно к такому же снижению температуры продуктов сгорания, как повышение коэффициента избытка воздуха с 1,0 до 1,2. То есть нехватка воздуха не столь уж сильно сказывается на температуре продуктов сгорания, но сильно повышает дымность дымовых газов (и загрязнение дымоходов).

Конечно, снижение температуры продуктов сгорания за счёт повышения расхода воздуха не снижает общего теплосодержания продуктов сгорания: газы становятся холодней, но объём газов увеличивается. Если бы печь располагала очень эффективными теплообменниками (например, очень длинными дымооборотами), то можно было бы уловить всё тепло продуктов сгорания. Но дымообороты имеют ограниченную длину, и чем ниже температура продуктов сгорания, тем меньше теплоотдача в стенки дымооборотов, тем больше тепла сбрасывается через дымовую трубу (несмотря на возможно очень низкую температуру дымовых газов на срезе дымовой трубы).

Вышеприведённые рассуждения относятся к идеальному случаю, не учитывающему, что в реальности сначала преимущественно прогорают летучие, а затем выгорают угли, составляющие примерно 34% от массы абсолютно сухих дров. Картина такова, что из 4500 ккал/кг тепла, образующегося от сгорания 1 кг абсолютно сухих дров, не менее 1800 ккал/кг выделяется при сгорании летучих, а до 2700 ккал/кг при сгорании углей. При этом из 5,96 кг/кг воздуха, потребляемого на стехиометрическое горение 1 кг дров, не менее 2,05 кг/кг потребляется при сгорании летучих, а до 3,91 кг/кг при сгорании углей. Теплота сгорания

древесного угля составляет 8100 ккал/кг при стехиометрическом расходе воздуха 11,5 кг/кг на 1 кг углей. Стехиометрические температуры продуктов сгорания летучих и углей примерно одинаковы 2000°С.

Стехиометрический расход воздуха для сжигания дров влажностью 25% составляет 4,77 кг/кг или 3,7 м³/кг. При реальных избытках воздуха в печах, достигающих $\alpha=2-3$, расход воздуха через печь можно условно принять для оценок 12 кг/кг, то есть 10 м³ воздуха в нормальном состоянии (1 атм, 20°С) на 1 кг дров влажностью 25%.

Далее под «воздухом» мы будем понимать исходный атмосферный воздух с натуральным содержанием кислорода 21% об. Это значит, что дрова в печи (по крайней мере, в условиях развитого горения) горят вовсе не в воздухе, а в дымовых газах того или иного состава. Это особенно очевидно при наличии на решётке сплошного слоя горящих углей, которые, как нетрудно подсчитать, должны были пропускать не менее 35% исходного кислорода для обеспечения сжигания летучих, выделяющихся из дров, горящих на углях (рис. 103а).

Способность слоя раскалённых углей пропускать кислород может быть обусловлена тонкостью угольного слоя и/или большой скоростью продува и/или низкой температурой угольного слоя (и соответственно медленностью реакции углерода с кислородом воздуха). Эти условия взаимосвязаны: большая скорость продува сокращает время реакции кислорода воздуха с углями, обуславливает «проскок» непрореагировавшего воздуха через слой углей, «проскок воздуха» фактически означает повышение коэффициента избытка воздуха в реакции с углями, что приводит к снижению температуры горящих углей и т. д. В этих условиях добиться гарантированного проникновения «воздуха» через слой углей для сжигания летучих весьма затруднительно, что подтверждает необходимость введения вторичного воздуха для сжигания летучих по индивидуальному каналу. Принимая пористость угольного слоя на уровне 0,4 и повышенную вязкость воздуха при высоких температурах (рис. 69), для обеспечения поступления 35% воздуха мимо угольного слоя необходимо использовать площадь проходного сечения индивидуального канала для вторичного воздуха на уровне 5% от площади колосниковой решётки.

Вместе с тем, газопроницаемость слоя углей на колосниковой решётке остаётся весьма неопределённой величиной, что делает решётку не столь уж удобным устройством для управляемого сжигания не только летучих, но и древесного угля. Так, например, удивительно, но факт, что слой пепла в подовой печи порой пропускает воздух под дрова ничуть не хуже, чем слой углей на колосниковой решётке. В связи с этим, напомним, что колосниковые решётки были изобретены вначале вовсе не для подачи воздуха, а для непрерывного вывода шлака от каменного угля

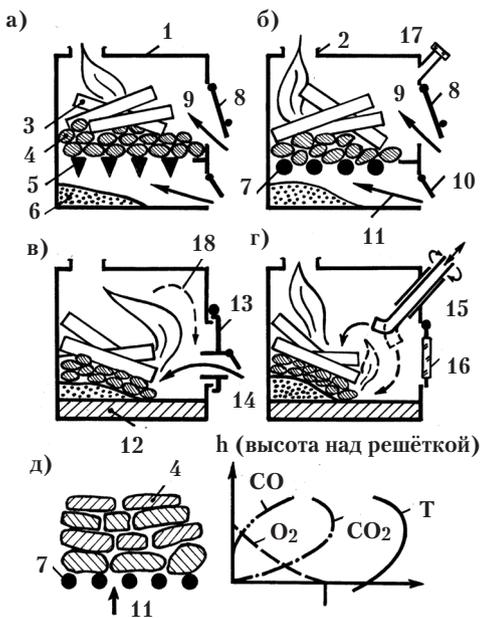


Рис. 106. Схемы воздухоподающих узлов: а – с чугунной колосниковой решёткой, б – со стальной решёткой из цилиндрических прутьев, в – с воздухоподающим отверстием (в корпусе или дверце) с фиксированным направлением подачи воздуха на под, г – с воздухоподающим патрубком, изменяющим направление подачи воздуха на под, д – схематическое строение слоя углей на решётке (слева), пространственное распределение температуры в слое и концентрация кислорода (справа) по книге В.В. Померанцева «Основы практической теории горения», Ленинград: Энергия, 1973 г. 1 – корпус топливника, 2 – дымовой патрубок (хайло), выпускающий дым в дымообороты или дымоход, 3 – поленья, 4 – угли, 5 – чугунные колосники решётки, 6 – зола в зольнике, 7 – стальные цилиндрические прутья

(в том числе арматурные) решётки, 8 – дверка топki, 9 – поток вторичного воздуха, 10 – дверка зольника, 11 – поток первичного воздуха, 12 – огнеупорный под, 13 – цилиндрическая или прямоугольная дверка топki, 14 – воздухоподающее отверстие с фиксированным направлением воздушного отверстия и регулированием проходного (живого) сечения дверкой, клапаном, задвижкой, глазком, краном и т. п., 15 – воздухоподающее отверстие с вращающимся патрубком, изменяющим направление входящего воздушного потока, 16 – застеклённая дверца, 17 – глазок для контроля горения (желательно со съёмным стеклом), 18 – циркулирующий дым.

(или золы от дров) из топki парового котла. Горящую смесь шлака и угля шуровали (перемешивали, ворошили) специальной кочергой (шуровкой) так, чтобы более мелкий шлак проскальзывал в ячейки решётки. Чтобы легче было шуровать (движениями взад и вперёд), горизонтальные прутья решётки стали располагать только вдоль топki и изготавливать в виде стержней, имеющих поперечное сечение в виде треугольника (колоса), направленного острием (острым углом) вниз (рис. 106а). Такая форма прутьев предотвращала заклинивание кусков шлака в промежутках решётки, поскольку если кусок проходил через верхние узкие щели решётки, то впоследствии он уже не мог застрять в расширяющихся внизу щелях. В крупных топках ремонтноспособные решётки стали набирать из отдельных сменных прутьев-колосников, что в свою очередь дало возможность делать колосники подвижными во время топki. Так, в судовых пароходных топках кочегар имел возможность периодически пово-

рачивать все колосники разом вокруг своей оси на угол не менее 45°C с помощью рычагов, расположенных в зольнике. Спекшийся шлаковый слой при этом взламывался и проваливался через решётку. В современных бытовых дровяных печах колосниковые стержни не имеют существенных преимуществ перед цилиндрическими прутьями (рис. 106б), поскольку если древесные угли и застрянут в решётке, то всё равно выгорят. Поэтому в быту одинаково часто применяют и самодельные сварные решётки из арматурной стали и покупные колосниковые решётки из литого чугуна, причём из чугуна можно лить решётки только в литевьи формы с канавками, зауживающимися к низу, то есть с получением решётки колосникового типа. Для сжигания древесины щели решётки делают более узкими (5–7 мм), чем для сжигания угля. Направление щелей решётки особого значения не имеет: шуровать в маленьких печах удобно и из стороны в сторону, и взад и перед. Возможны и многослойные решётки – сверху крупная для дров, снизу мелкая для углей. Решётки выносят потоком воздуха часть пепла в дымоходы.

Достоинства решёток в плане непрерывного отвода шлаков и пепла из топки в зольник не могут быть поставлены под сомнение, поскольку подовые топливники для длительной непрерывной работы (сутки, недели, месяцы) вообще не пригодны. Но при эпизодической топке глухой под особым проблем не создаёт и не выносит пепел в каменку. Слой пепла до 5 см ещё не затрудняет полного сгорания дров и даже создаёт благоприятные условия для горения в части ограничения тепловых потерь вниз из зоны горения за счёт высоких теплоизоляционных свойств пепла. Слой пепла до 5 см создаётся после 3–7 разовых протопок. Если возникают бытовые проблемы с хлопотностью частой чистки печи, можно оборудовать специальный накопитель пепла в виде колодца (в том числе и с решёткой), в который ссыпается скребком пепел после каждой протопки.

Что касается подачи воздуха для горения дров, к колосниковым решёткам возникает масса вопросов. Во всяком случае даже в отопительных кирпичных печах в деревенском и сельском быту очень часто используют глухой под и воздухоподающие отверстия в дверке топки. Вопреки расхожему в литературе мнению, колосниковая решётка вовсе не всегда обеспечивает доступ воздуха во все зоны закладки дров в печи. И причиной этого является наличие на всей решётке сплошного слоя горящих углей, забирающих весь кислород из воздуха так, что вышележащие поленья уже не горят, а просто нагреваются в потоке дымовых газов и претерпевают пиролиз. Реально процесс ещё более сложный, поскольку образовавшаяся в результате горения углей в кислороде двуокись углерода $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ сама начинает реагировать с верхними слоями углей с образованием окиси углерода $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ (рис. 106д). Так что даже в случае сжи-

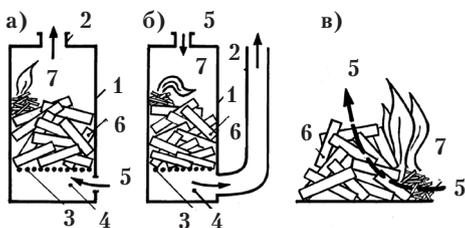


Рис. 107. Примеры процессов внешнего горения: а – верхнее горение с подачей воздуха снизу, б – верхнее горение с подачей воздуха сверху, в – боковое (переднее) горение костра. 1 – корпус топливника, 2 – дымоход, 3 – решётка, 4 – зольник (поддувало), 5 – подача воздуха под решётку, 6 – поленья, 7 – розжиг растопки.

гания древесного угля процесс на решётке как минимум трёхстадиен: сначала образуется CO_2 , затем CO , а потом CO сгорает до CO_2 над углями, но только при подаче дополнительно (так называемого вторичного) воздуха в зону над углями.

Если же на решётке сжигают дрова, то кислород может проникать во все зоны дров только на этапе растопки печи, пока нет углей. Но воздух во всей закладке дров в этом случае и не нужен, поскольку он может потребиться лишь в отдельных зонах воспламенения дров. Поэтому методический интерес может представить режим верхнего горения, когда на решётку 3 загружается порция дров 6 и поджигается растопкой 7 сверху (рис. 107а). В этом случае дрова играют роль «решётки», в свою очередь расположенной на решётке 3, и действительно пронизываются потоком свежего воздуха. Такая схема в быту встречается редко, поскольку процесс развития пламени сверху вниз затруднён, особенно при рыхлых закладках. В печах и кострах обычно используется поджиг вышележащих поленьев нижележащими. В промышленности известна схема подачи воздуха сверху вниз на поверхность горящих поленьев (рис. 107б), но в дачных условиях такая схема неудобна, поскольку требует принудительной подачи воздуха сверху вниз компрессором и вывода дымовых газов вытяжным вентилятором. Так что процесс верхнего горения на решётке реален лишь в схеме с постоянной подачей поленьев на слой горящих углей (рис. 103а), принятой во всех бытовых чугунных отопительных котлах (рис. 102б).

Имеется ещё одна схема, реализующаяся в кострах, открытых очагах, каминах, русских печах (рис. 107в). Имеется в виду так называемое боковое горение, когда растопка 7 разжигается с краю костра на наветренной (передней) стороне. Ветровой поток 5 при этом пронизывает с определённой эффективностью все поленья костра, перенося с собой теплоту сгорания растопки внутрь кучи поленьев. В этой схеме очень важно подавать воздух в нужные зоны костра с требуемой скоростью так, чтобы пламя двигалось фронтом, «не перескакивая» на весь верх костра нерегулируемым образом. В печах этот режим удобно реализовывать при полном и плотном заполнении топки (или подполочного пространства) по-

леньями так, чтобы дрова горели с торцов (рис. 103г). Колосниковая решётка в этой схеме вообще не предусматривается, воздух для сгорания углей подаётся из воздухоподающего устройства 17 по дну печи (по поду), которое делается огнестойким и теплоёмким для прогрева дров и устойчивости горения при всех коэффициентах избытка воздуха в печи. Тепло от горящих углей подогревает вышележащие торцы поленьев, из которых начинают выделяться летучие, которые сгорают пламенем в верхней камере над дымооборотом 16 (рис. 103г). Если удаётся организовать подачу воздуха из отверстия 17 (а точнее, группы отверстий) настолько идеальным образом, чтобы воздух равномерно обдувал торцы всех горящих поленьев, то дрова горят фронтом, распространяющимся к задней стенке, фактически не оставляя после себя углей. В реальности преимущественный поток воздуха по поду обуславливает преимущественное выгорание углей снизу, верхние угли обваливаются. В результате образуется завал долго прогорающих углей на поду и с быстрым распространением пламени по верху закладки дров к задней стенке. Боковое горение (называемое в печах передним) переходит при этом в верхнее. По физической сути боковое (переднее) и верхнее горение можно объединить понятием внешнего горения закладки дров, в отличие от нижнего горения, которое можно считать внутренним.

Режим бокового (переднего) горения очень чувствителен к коэффициенту избытка воздуха и к характеру подачи воздуха в зону горения. Если воздух в зону горения подаётся неограниченно через широко раскрытые воздухозаборные отверстия, то угли и летучие горят одновременно и спокойно, как в костре – пламя от горения летучих невысокое, ленивое (при высокой закладке дров может быть и дымное). Если доступ воздуха в зону горения ограничить, то вид пламени будет зависеть от того, как ограничивается доступ воздуха. Если прикрывать нижнее воздухозаборное отверстие 17, оставляя открытым верхнее воздухозаборное отверстие 18 (рис. 103г), то пламя, оставаясь низким и спокойным, несколько увянет (дымление дров может немного снизиться). Это происходит потому, что подача воздуха к углям (за счёт «провала» холодного воздуха вниз) ограничивается, количество летучих снижается, а расход воздуха на догорание летучих остаётся на прежнем высоком (достаточном) уровне.

Если прикрывать верхнее отверстие 18, оставляя открытым нижнее 17, то высота пламени увеличивается, огненные языки начинают проникать через хайло в дымовую трубу. Это означает, что в условиях нехватки воздуха (кислорода) сажистые частицы в летучих не успевают быстро выгореть и даже в дымовой трубе, может быть, так и не найдут достаточного количества кислорода, чтобы сгореть полностью, затем рано или поздно охлаждаются и в виде чёрного дыма выйдут через трубу в атмосферу.

Ещё более разительные перемены произойдут в печи, если при хорошо разгоревшихся углях сначала прикрыть верхнее отверстие 18, а затем прикрыть и нижнее отверстие 17. Раскалённый топливник и угли не могут охладиться мгновенно. Поэтому раскалённый топливник при прекращении подачи воздуха превращается в газогенератор, заполняющийся горючими газообразными продуктами пиролиза. При наличии подсосов воздуха в печи, в первую очередь в дымоходах, может образоваться взрывоопасная смесь воздуха с горючими газами пиролиза, при воспламенении которой печь может даже разрушиться (взрывные случаи известны). Более интересным представляется штатный случай, когда при закрытом верхнем отверстии 18 нижнее отверстие 17 закрывается постепенно. При этом огненные языки, устремляющиеся в дымоход, ещё более расширяются, контуры пламени размываются, пламя превращается в диффузное свечение (призрачно-прозрачное), заполняющее весь объём топливника. Но пламя это «холодное», не излучает лучистого тепла, поскольку частицы раскалённой сажи очень мелкие (менее 1 мкм), и пламя прозрачное. При этом в печи появляется гул – это пламя «в поисках кислорода начинает метаться» по всем углам топливника.

С физической точки зрения гул обусловлен прежде всего тем, что летучие выделяются в топливнике из зоны раскалённых дров, а воздух поступает в топливник в совсем иные зоны – пристеночные (или, например, в зольник). При этом для горения необходимо, чтобы горючие газы и воздух пришли в соприкосновение, а ещё лучше, чтобы перемешались между собой. Поэтому в условиях, когда в топливник в целом поступает ровно столько воздуха, сколько нужно для горения летучих и углей в рассматриваемый момент, возникает ситуация, когда воздух заполняет, к примеру, угол топливника, но «жизненно» необходим в совсем иных точках топливника, а именно в тех, где есть несгоревшие летучие. Привести горючие газы в контакт с поступающим воздухом можно за счёт быстрого перемешивания в топке, то есть за счёт турбулентности. Поэтому все стехиометрические пламена турбулентны в зоне горения, а значит издадут акустические колебания точно так же, как водопроводная труба начинает гудеть при появлении турбулентности водного течения. Но в печи, в отличие от водопроводной трубы, в ходе обычного перемешивания происходит ещё процесс образования пространственных микрозон со взрывоопасной газозвушной средой – горючие газы постепенно подмешиваются в воздух, локализованный, к примеру, в углу топливника, а после достижения нижнего концентрационного предела воспламенения НКПВ (см. раздел 5.6.5) разом возникает фронт движущегося пламени в углу топливника, воспринимаемый как микрохлопок (местный взрыв газозвушной среды в некой ограниченной пространственной области).

Микрохлопки возникают в зонах с недостатком воздуха и с его избытком, так что в результате микрохлопков, как правило, образуются газообразные продукты сгорания, обогащенные либо воздухом, либо горючими газами, и процессы перемешивания (в том числе с образованием локальных взрывоопасных микрозон) продолжают. Режимы горения с микрохлопками называются разными авторами турбулентными, неустойчивыми, пульсационными, колебательными и т. д. Все эти режимы хорошо известны в технике и обуславливают, в частности, рёв ракетных и реактивных двигателей.

Режим с микрохлопками (рёвом, воем, гулом) может переходить в пульсирующий режим с мощными периодическими (примерно раз в секунду) хлопками, сопровождающимися выбросами пламени и дыма из всех щелей печи. Этот режим совершенно недопустимый для печей, поскольку задымляет помещение и создаёт пожароопасную ситуацию. Для выхода из этого режима необходимо как ни удивительно, вовсе не закрывать, а наоборот, полностью открывать все воздухозаборные отверстия 18 и даже дверцу топливника 11 – хлопки, гул и длинные пламена тотчас исчезают, пламя становится обычным, как у костра.

Отметим, что перераспределение подачи воздуха из зоны горения углей в зону дожигания летучих может быть достигнуто многими техническими решениями, в том числе простейшими, например, вращением специальных трубчатых распределителей воздушного потока 15 (рис. 106в). При этом дрова «не знают», горят ли они в костре, камине или в очаге, в кирпичной ли печи или металлической. Но тем не менее, им важно очень многое: и как подаётся на них воздух, откуда (с какой стороны) и с какой скоростью, как удаляются дымовые газы, сколько тепла отбирается из зоны горения и сколько тепла извне приходит в зону горения, причём важно даже в какие именно точки зоны горения подаётся воздух и дополнительное тепло. Анализируя все эти факторы, дачник может объяснить, а значит и изменить в своей печи очень многое.

5.7.3. Механизмы теплосъёма в печах

Тепло, выделившееся в результате химической реакции горения дров, разделяется в печи на две части: на «полезное» тепло, идущее на нагрев помещения (стен, потолка, пола, воздуха, людей, самой печи и т. п.), и на тепло, безвозвратно и «бесполезно» выброшенное из дымовой трубы в атмосферу. Слово «бесполезно» поставлено в кавычки из-за того, что наряду с действительной невозможностью использования тепла дыма, выброшенного в атмосферу, для нагрева помещения, тем не менее, тепло дыма было полезно и необходимо, поскольку именно это тепло создава-

ло тягу в трубе для подачи воздуха в печь. Бывает так, что «тепловая» цена за тягу оказывается несуразно высокой, и дачник пытается снизить эту цену. При этом у дачника фактически только два пути: снижать температуру выбрасываемых дымовых газов или снижать массовый расход дымовых газов (при одной и той же скорости горения дров). Исторически на этапе перехода от открытых очагов через каминны к печам снижался массовый расход дымовых газов (или, что одно и то же, расход подаваемого воздуха). На этапе перехода к многооборотным печам снижалась температура выбрасываемых дымовых газов. Сейчас, на этапе перехода к герметичным металлическим печам, стремятся ещё больше снизить массовый расход дымовых газов.

Доля теплотворной способности дров, «полезно» выделенная (использованная) в виде тепла в печи, называется коэффициентом полезного действия печи (КПД). Для дровяных печей практический интерес представляет величина КПД за весь период работы печи, например, КПД в расчёте на всю зиму. В быту такую оценку КПД производят сельские жители по фактическому расходу дров. Говорят, например, мол, прежняя печь сжигала «так мало дров, а новая вон сколько». В технике оценку КПД производят также по фактическим тепловыделениям и фактическому расходу дров по ГОСТ 9817-95 за один час устоявшегося режима горения печи или по ГОСТ 2127-47 и ГОСТ 3000-45 за одну единичную протопку или за межпротопочный период, например, за одни сутки. Кроме того, сейчас КПД дифференцируют по отдельным целевым назначениям нагрева, например, КПД по нагреву воды, КПД по варочной плоскости, КПД по каминке, КПД по нагреву воздуха и т. п. Дифференцированные значения КПД особенно ценны и информативны именно в случае банных печей, причём само понятие «полезности» действия в банных печах может отличаться от «полезности» в бытовых отопительных печах. Это обусловлено тем, что сам по себе нагрев печи (тем более внутренних зон) не тождественен полезному результату – нагреву помещения (ГОСТ 3000-45). Так, в частности, тепло от нагретых до 40°С участков внешней стороны кирпичной печи, «полезное» для отопления жилого помещения, абсолютно «бесполезно» для высокотемпературной сауны: более того, такие участки печи лишь захлаживают воздух. Иногда пользуются некорректным понятием «КПД топливника» (ГОСТ 2127-47), понимая под этим полноту сгорания топлива в печи, никак не связанную с процессами теплоотдачи ни в сам топливник, ни в печь в целом.

Ещё больше тонкостей придётся учитывать при анализе временного хода изменения КПД в ходе протопки. Такой «минутный» или даже «секундный» КПД (то есть КПД, усреднённый по короткому промежутку времени, например, за минуту или секунду, а фактически равный мно-

венному значению величины) будет сложным образом изменяться во времени. Причём совершенно ясно, что в идеальном оптимальном режиме КПД кирпичной печи в период растопки печи должен быть как можно ниже, поскольку всё тепло в начале растопки должно идти на разогрев дымовой трубы и на создание тяги. В реальности же КПД в начале протопки максимален и только потом сокращается во времени, поскольку внутренности печи (топливника и дымооборотов) разогреваются, и дымовые газы начинают выходить из трубы более горячими. А вот в водогрейных котлах внутренние стенки существенно не нагреваются и остаются относительно холодными с постоянной во времени температурой. Только знание КПД именно на том или ином этапе протопки может дать правильный путь к оптимизации печи. А банная печь, как мы уже отмечали, фактически не имеет устоявшегося режима – сначала она всё время разгорается, а потом она долго тухнет. И время горения металлической печи в большинстве случаев не превышает одного-двух часов.

Тепло от продуктов сгорания отбирается теплосъёмными элементами (в том числе стенками топливника и дымоходов) за счёт кондуктивно-конвективного теплообмена и за счёт лучистого, причём соотношение вкладов этих каналов теплопередачи во время горения разовой закладки дров меняется. При растопке любой печи вначале преобладает кондуктивно-конвективный механизм теплопередачи, роль которого постепенно по мере прогрева печи снижается в пользу лучистого.

Кондуктивный поток тепла определяется разностью температуры дымовых газов T и температуры стенки теплосъёмного элемента T_T и составляет $\alpha(T-T_T)$, где $\alpha=10$ Вт/м²-град – коэффициент кондуктивной теплопередачи (в реальности колеблется в пределах (7–12) Вт/м²-град, в зависимости от ориентации поверхности). Если дымовые газы движутся со скоростями до $V=4$ м/сек, то коэффициент кондуктивно-конвективной теплопередачи (суммарный кондуктивный и конвективный) может локально возрастать до $\alpha=10+6V$, где V в м/сек.

В металлических водогрейных котлах водоохлаждаемые стенки не нагреваются выше 100–150°C, вследствие чего локальные значения кондуктивно-конвективных тепловых потоков от дымовых газов с температурой 700–900°C на стенки котла достигают 30 кВт/м². В кирпичных печах стенки топливника постепенно нагреваются вслед за разгоранием дров вплоть до 600–1000°C, вследствие чего локальное значение кондуктивно-конвективных тепловых потоков постепенно снижается с 30 кВт/м² до 5 кВт/м². Дымовые газы, не способные охладиться в топливнике, выносят своё тепло в дымообороты.

Кондуктивно-конвективный теплообмен среди печников традиционно (и обосновательно) считается основным (преобладающим) в топках,

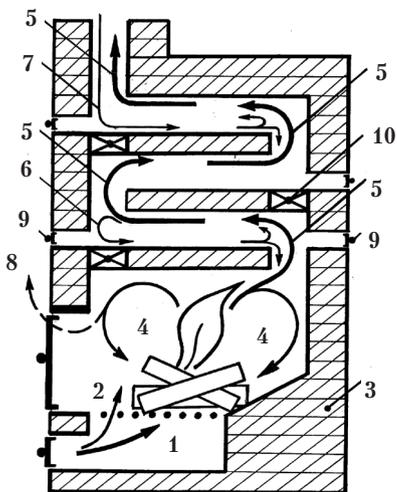


Рис. 108. Принципиальная схема бытовой отопительной печи с горизонтальными дымооборотами. 1 – поток воздуха через решётку и горячие угли, 2 – поток воздуха через оголённый участок решётки для сжигания летучих (вторичный воздух), 3 – кирпичная кладка печи, 4 – циркуляционные траектории дымовых газов, 5 – вытяжная траектория дымовых газов, 6 – циркуляционные траектории дымовых газов в дымооборотах, 7 – нисходящий поток воздуха в дымовой трубе, 8 – возможный выход циркуляционного потока дымовых газов в открытую дверку топливника, вызывающий дымление печи в помещении, 9 – дверки для прочистки, 10 – возможные месторасположения растопочных задвижек (летних дымоходов).

вследствие чего удлинение дымооборотов с увеличением их поверхности часто рассматривается как наиболее эффективное средство повышения КПД печей, по крайней мере, кирпичных (рис. 108). Даже в области металлических бытовых отопительных печей очень часто ошибочно полагают, что известные способы, интенсификации конвективного теплообмена (турбулизацией газа или повышением площади внутренних стенок топливника) могут существенно повысить теплоотдачу печи.

На самом деле, языки пламени, касаясь стенок топливника, передают тепло в стенки не только контактным кондуктивно-конвективным способом, но и за счёт лучистого тепла. Лучистые потоки тепла в топках достигают уровня 40–100 кВт/м². Их появление и перераспределение имеют в печах свои особенности.

Во-первых, горячие дымовые газы способны нагревать различные поверхности (жаровни), и уже те в свою очередь начинают излучать до 100 кВт/м² при температуре 1000°С. Ясно, например, что газ на оси дымового канала не может отдавать своё тепло стенкам канала кондуктивно-конвективной теплопередачей, но если на оси дымового канала поместить металлическую пластинку, то она будет нагреваться и излучать тепло на стенки канала (рис. 109а). Дымовые газы на оси при этом охлаждаются. Или, например, можно утеплить потолок дымового колпака (перекрыши) так, чтобы дымовые газы не нагревали кирпичную кладку верха печи, а нагревали бы только поверхность колпака, которая в свою очередь, разогревшись, направит тепло своего излучения в нижние зоны колпака (вниз на нижние слои кладки печи), что более полезно для на-

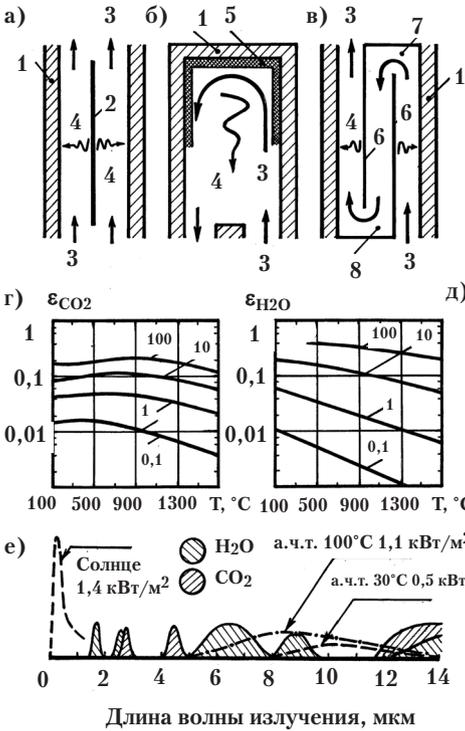


Рис. 109. Жаровые элементы в дымоходах (газоходах, дымооборотах, дымовых трубах), нагревающиеся в потоке горячих газов (отбирая от них тепло и охлаждая их) и излучающих лучистое тепло на стенки каналов дымоходов: а – безоборотный дымоход (канал), б – бесканальный колпаковый дымоход, в – многооборотный дымоход, г – температурная зависимость степени черноты ϵ_{CO_2} газового слоя углекислого газа, д – температурная зависимость степени черноты ϵ_{H_2O} газового слоя водяного пара (цифры при кривых на рис. «г» и «д» соответствуют произведениям $p(CO_2) \times l$ и $p(H_2O) \times l$, где $p(CO_2)$ и $p(H_2O)$ – парциальные давления углекислого газа и водяных паров в кПа (1 атм=100 кПа), l – толщина слоя в метрах), е – спектры поглощения CO_2 и H_2O (штриховые зоны), излучения Солнца и абсолютно чёрных тел (а. ч. т.). 1 – стенки каналов дымоходов (кирпичные, керамические, металлические), 2 – металлический жаровой элемент, расположенный в дымовом канале (пластина, в том числе выгнутая, свёрнутая в трубу, согнутая волной, скрученная винтом-спиралью и т. п., цепи, тросы, проволоки продольные), 3 – направление движения дымовых газов, 4 – направление лучистых потоков с жаровых элементов, 5 – жаровой элемент в виде утеплённого верха (потолка) колпака в дымоходе, 6 – рассечки-стенки дымооборотов (кирпичные, стальные), выполняющие роль жаровых элементов, 7 – зона «перевала» – разворота газов сверху вниз, 8 – зона «подвёртки» – разворота газов снизу вверх.

ный в дымовом канале (пластина, в том числе выгнутая, свёрнутая в трубу, согнутая волной, скрученная винтом-спиралью и т. п., цепи, тросы, проволоки продольные), 3 – направление движения дымовых газов, 4 – направление лучистых потоков с жаровых элементов, 5 – жаровой элемент в виде утеплённого верха (потолка) колпака в дымоходе, 6 – рассечки-стенки дымооборотов (кирпичные, стальные), выполняющие роль жаровых элементов, 7 – зона «перевала» – разворота газов сверху вниз, 8 – зона «подвёртки» – разворота газов снизу вверх.

грева воздуха в помещении (рис. 109б). Даже внутренние стенки дымооборотов можно рассматривать как жаровни, нагревающиеся дымовыми газами и излучающие тепло на внешние стенки дымооборотов (рис. 109в). Эффективность жаровен возрастает с увеличением их площади. Отметим, в частности, что широкоизвестные винтовые завихрители (в виде стальных продольных пластин, скрученных в винт и плотно вставленных в цилиндрические жаровые трубы) газовых котлов, работают больше как излучающие элементы (жаровни), нежели как просто завихрители воздуха, якобы существенно повышающие конвективную составляющую теплообмена за счёт турбулизации потоков дымовых газов.

Во-вторых, любой даже абсолютно не задымлённый газ излучает (а также и поглощает) свет в виде отдельных спектральных линий, отвечающих квантовым переходам атомов и молекул. Спектральные линии молекул сгруппированы в ансамбли (полосы), поскольку любой электронный уровень молекулы (в отличие от электронных уровней атомов) расщеплен на многочисленные колебательные, вращательные и деформационные подуровни. Молекулы азота и кислорода в спектральной области (0,5–25) мкм практически не излучают и не поглощают. Поэтому воздух и дымовые газы излучают и поглощают только из-за наличия трёхатомных молекул углекислого газа (0,03% об. в свежем воздухе, до 1% об. в банях, до 20% об. в дымовых газах) и водяных паров (1% об. в свежем воздухе, до 10% об. в банях, до 50% об. в дымовых газах). В тонких слоях интенсивность излучения (и степень поглощения) газа растёт линейно с увеличением толщины слоя l и с повышением парциального давления (объёмного содержания) примесей углекислого газа $p(\text{CO}_2)$ и водяных паров $p(\text{H}_2\text{O})$, то есть с увеличением произведения $p \times l$. При этом спектральные линии, сохраняя свою форму, лишь растут по амплитуде. С ростом толщины слоя интенсивность излучения в центрах спектральных линий может достичь интенсивности излучения абсолютно чёрного тела при той же длине волны излучения и при той же температуре газа. При этом центр спектральных линий уже не могут далее возрастать по своей амплитуде и с увеличением толщины слоя и остаются на постоянном уровне излучения (насыщаются). Но интенсивность излучения в крыльях спектральных линий продолжает расти с увеличением толщины слоя газа. В результате интенсивность линейчатого излучения в тонких слоях пропорционально $p \times l$, а в толстых слоях пропорционально $(p \times l)^{1/2}$. Интенсивность же сплошного (по спектру) излучения (серого) растёт экспоненциально $[1 - \exp(-p \times l)]$.

Напомним, что пары воды имеют полосы поглощения (1,5–1,75) мкм, (2,5–3,0) мкм, (4,8–8,0) мкм, (8,0–9,5) мкм и (12,5–25,0) мкм, а углекислый газ (2,4–3,0) мкм, (4,0–4,8) мкм и (12,5–16,5) мкм. При сжигании каменного угля и нефти возможно появление полос поглощения двуокиси серы SO_2 (3,8–4,0) мкм, (4,1–4,6) мкм, (6,9–9,5) мкм и (15,8–23,2) мкм. Так, например, наличием в атмосфере Земли углекислого газа объясняют парниковый эффект атмосферы. Излучение Солнца, достигающее Земли с интенсивностью 1,4 кВт/м², имеет спектральный максимум в видимой области спектра на сине-зелёных длинах волн 0,4–0,5 мкм, где газовая составляющая атмосферы прозрачна (но может поглощать пыль в атмосфере). Поэтому излучение Солнца достигает поверхности Земли и нагревает её. В свою очередь нагретая поверхность Земли излучает тепло в космос. Ввиду низкой средней температуры поверхности Земли 30°С, максимум теплового излучения приходится на длину волны 10 мкм. Та-

кое излучение с мощностью порядка $0,5 \text{ кВт/м}^2$ (в предположении «а.ч.т.» – абсолютно чёрного тела) может частично поглощаться водяными парами и углекислым газом, содержащимися в атмосфере, и в космос не удаляться, а нагревать атмосферу (см. рис. 109е). Чем больше в атмосфере углекислого газа, тем выше температура атмосферы. Так, например, подсчитано, что при увеличении объёмного содержания углекислого газа CO_2 в атмосфере с обычного уровня (0,03–0,04)% об. вдвое до 0,08% об. средняя температура земной поверхности повысилась бы на 4 градуса, что привело бы к катастрофическому климатическому эффекту – усиленному таянию льдов и повышению уровня мирового океана.

Таблица 18

Расчётный состав дымовых газов при давлении 1 атм (0,1 МПа)
(парциальные давления компонентов в кПа, то есть объёмные доли
компонентов в процентах)

Топливо	α	CO_2	H_2O	N_2	O_2
Дрова сухие $w=0$	1	17	14	69	0
Дрова сухие $w=0$	3	6	5	76	13
Дрова сырые $w=200\%$	1	11	43	46	0
Дрова сырые $w=200\%$	3	5	20	64	11
Углерод (угли)	1	21	0	79	0
Метан CH_4	1	9	18	73	0
Октан C_8H_{18}	1	12	13	75	0
Бензол C_6H_6	1	15	8	77	0
Дизельное топливо (условный стандарт дымовых газов)	1	13	11	76	0

Примечание. Снижение концентрации CO_2 до 4% по ГОСТ 9817-95 или до 3% по НПБ 252-98 считается завершением горения.

Значения степеней черноты ϵ слоёв газа, содержащих водяные пары или углекислый газ, приведены на рис. 109г и д. Цифрами у кривых указаны произведения $p \times l$, где p – парциальные давления водяных паров и углекислого газа в кПа (см. табл. 18), а l – толщина слоя (средняя) в метрах (А.Л. Бергауз и др., Справочник конструктора печей прокатного производства, под ред. В.М. Тымчака, т. 1 и 2, М.: Металлургия, 1970 г.). Степени черноты слоёв газа определяются из соотношения $\epsilon \sigma T^4 = \int \kappa_{\lambda} v_{\lambda} d\lambda$, где σ – постоянная Стефана-Больцмана, T – абсолютная температура, κ_{λ} – коэффициент поглощения слоя газа на длине волны λ (в профиле

спектральных линий), w_λ – спектральная мощность излучения абсолютно чёрного тела (кривая Планка). Таким образом, слои прозрачных дымовых газов толщиной 0,5 м имеют степени черноты 0,1–0,2 и способны излучать тепло с мощностью до 20 кВт/м² при температуре 1000°С.

В-третьих, дымовые газы обычно оказываются задымлёнными, то есть содержат раскалённые частицы сажи, имеющие температуру, равную температуре дымовых газов (см. раздел 5.7.11). Степени черноты дымового пламени бывают разными, иногда приближаясь даже к единице, так что мощности излучения факелов при 1000°С могут достигать 100 кВт/м². Отметим, что теплопередача от факела, заполняющего весь топливник или дымоход (при коэффициенте избытка воздуха, близком к единице), определяется площадью внутренней поверхности топливника точно так же, как и кондуктивно-конвективная теплопередача. Поэтому в развитом факельном режиме увеличение площади внутренней поверхности топливника (или иных теплосъёмных элементов) путём гофрирования (изломанности) даёт увеличение теплосъёма с дымовых газов (см. раздел 5.7.13).

В-четвёртых, очень большой вклад в тепловой баланс топливника даёт излучение раскалённых углей, особенно на завершающем этапе топки, когда на решётке остаются только древесные угли, сгорающие беспламенным образом. Если вся решётка завалена углями, то проскок кислорода через угли маловероятен, коэффициент избытка воздуха близок к единице, дымовые газы и горящие угли должны иметь высокую температуру. Однако, температура продуктов сгорания T вовсе не равна 2000°С. Дело в том, что теплота сгорания углей преобразуется не только в теплосодержание раскалённых дымовых газов, но и в тепловое излучение углей $q_y = Q_y G_y = S_y \sigma T^4 + (1 + 11,5) C_p \cdot G_y \Delta T$, где $Q_y = 8100$ ккал/кг – теплота сгорания углерода (углей), G_y (кг/сек) – скорость сгорания углей, S_y – площадь слоя углей, $C_p = 0,32$ ккал/кг-град – средняя теплоёмкость дымовых газов, величина 11,5 в скобках является стехиометрическим коэффициентом углерода по воздуху (для сжигания 1 кг углерода требуется 11,5 кг воздуха). Так, в соответствии с расчётом по указанному соотношению при площади слоя углей 20×20 см при скорости сгорания углей 1,2 кг/час (мощность горения 11,3 кВт) слой углей имеет температуру 900°С и излучает 4,7 кВт лучистого тепла, а при скорости сгорания углей 4,7 кг/час (мощности горения 44 кВт) слой углей имеет температуру 1200°С и излучает 11,5 кВт лучистого тепла. Таким образом, при увеличении расхода воздуха мощность излучения слоя углей на решётке постоянной площади растёт количественно, но относительная доля излучения в тепловом балансе топливника снижается. Аналогично, при уменьшении площади слоя угля при неизменном расходе воздуха температура слоя растёт, но доля излучения падает. Поэтому, если дач-

ник хочет, чтобы его металлическая печь выдала всё тепло от горения углей в стенки топливника (причём в виде излучения), то надо делать решётку побольше и угли распределять на большую площадь, а скорость подачи воздуха сделать минимально необходимой. Такой режим очень выгоден для поддержания тепла в бане после протопки. Если же угли быстро выжечь большим потоком воздуха, как часто рекомендуется в литературе, то всё тепло вылетит в трубу, и при отсутствии дымооборотов безвозвратно потеряется без пользы для бани.

Вообще говоря, лучистый теплообмен играет большую роль (нежели кондуктивно-конвективный) при малой разнице температур дымовых газов и стенок теплосъёмных элементов, поскольку $(T^4 - T_r^4)$ более чувствительно к температуре, нежели $(T - T_r)$. А чем выше T_r тем более эффективна печь для нагрева воздуха. Поэтому попытки анализа и конструкторских расчётов топливников и дымооборотов банных печей без учёта вклада лучистого теплопереноса могут приводить к существенной погрешности. Также и стремление придать топливникам какую-либо хитрую специальную форму с множеством изломов для увеличения площади контакта дымовых газов с корпусом часто не приводит к ожидаемому повышению теплоотдачи, поскольку лучистая теплоотдача вообще не зависит от формы топливника, а конвективная теплоотдача при горячих стенках (и кирпичных, и металлических) весьма мала. Фигурность топливника оправдана в случае строго холодных (менее 100°C) стенок водогрейных котлов и змеевиков, где добиваются теплосъёма конвекцией на уровне 0,5 от теплоты сгорания дров, а радиацией до 0,4 (общий коэффициент полезного действия достигает 0,9). В отопительных металлических печах теплосъём конвекцией не превышает 0,2, а радиацией до 0,4 (общий коэффициент полезного действия до 0,6); наибольший КПД достигается при минимально возможных скоростях подачи воздуха. Поэтому и режимы длительного горения в условиях тления дров при малых скоростях подачи воздуха также имеют весьма высокие коэффициенты полезного действия – в металлических печах не ниже 0,6.

В заключение вспомним принципы некогда общепринятого расчёта отопительных печей, который рассматривает процесс горения дров в печах крайне усреднённо (в предположении сгорания углей и летучих одновременно) и не углубляется в детали вышерассмотренных особенностей процесса горения (ГОСТ 2127-47 «Печи отопительные теплоёмкие. Нормы проектирования», отменённый с 01.01.76 без замены). Тепловой расчёт кирпичного топливника выполняется для «основного периода интенсивного горения топлива» без учёта излучения для разовой закладки дров исходя из неких «нормативных» показателей (закладываемых в расчёт догматически) в следующей последовательности:

– исходя из требуемой теплоотдачи печи по нормируемой продолжительности топки $m=1-2$ часа, срока остывания (времени теплоотдачи) печи, нормируемому коэффициенту полезного действия КПД=0,7 и нормируемой теплоте сгорания дров определяют необходимый расход дров (топлива) за время одной топки G ;

– исходя из расчётного значения G рассчитывают площадь пода топливника S_T по плотности дров ρ и нормируемой толщине слоя топлива $h_{сл}$ по формуле $S_T=G/\rho h_{сл}$;

– исходя из расчётного значения G рассчитывают площадь колосниковой решётки по формуле $S_p=G/mB_p$, где B – нормируемое значение допустимого удельного напряжения колосниковой решётки, установленное, видимо, опытным путём без учёта аэродинамического сопротивления закладки дров и слоя углей;

– рассчитывают высоту топливника по нормируемому значению удельного теплового напряжения объёма топливника Q_T/V_T (где Q_T – мощность, идущая на стенки топливника, то есть мощность сгорания дров, умноженная на КПД, V_T – объём топливника);

– рассчитывают площадь поддувального отверстия исходя из нормируемого практически необходимого расхода воздуха и нормируемой скорости движения воздуха в живом (проходном) сечении поддувального отверстия, принимаемой равной (1–2) м/сек. Некогда нормировавшиеся по ГОСТ 2127-47 параметры топливников приведены в таблице 19.

Таблица 19

Нормативные показатели для расчёта топливников отопительных печей
(А.Н. Сканави, Отопление, М.:АСВ, 2002 г.)

Вид топлива	Дрова влажностью 25%
Теплота сгорания	12600 кДж/кг (3000 ккал/кг)
Плотность топлива	400 кг/м ³
Температура горения	1000°С
Удельное напряжение колосниковой решётки	250 кг/час·м ²
Толщина слоя топлива	0,25–0,35 м
Объём воздуха, практически необходимый для сжигания 1 кг топлива	10 м ³ /кг
Наименьшая высота над слоем топлива	0,25–0,45 м
Удельное тепловое напряжение объёма топливника Q_T/V_T	405 кВт/м ³

Обращаем внимание, что объём воздуха, заложенный на сгорание дров, вдвое превышает стехиометрический уровень (см. раздел 5.7.2). Это значит, что кирпичные печи рассчитывают на коэффициент избытка воздуха на уровне $\alpha=2$, и расчётная высота топливника должна соответствовать высоте пламени в этом режиме. Для режимов с меньшим α (с высокими пламенами) нормативную величину Q_T/V_T следует, видимо, существенно снижать. Тем не менее, описанный стандартный расчёт позволяет хотя бы приблизительно сориентироваться по конструкторским параметрам. Для сведения приведём также некогда нормировавшиеся параметры для расчёта газоходов (дымоходов) отопительных печей.

Таблица 20

Показатели для расчёта газоходов отопительных печей
(А.Н. Сканава, Отопление, М.: АВС, 2002 г.)

Вид топлива	Дрова влажностью 25%
Топливник:	
– температура	1000°С
– тепловая нагрузка на стенки	7 кВт/м ²
Первый газоход:	
– температура	700°С
– тепловая нагрузка на стенки	5,2 кВт/м ²
– скорость движения газов	1,5–4,0 м/сек
Второй газоход:	
– температура	500°С
– тепловая нагрузка на стенки	2,7 кВт/м ²
– скорость движения газов	1,5–2,0 м/сек
Третий газоход:	
– температура	160°С
– тепловая нагрузка на стенки	2,7 кВт/м ²
– скорость движения газов	1,5–2,0 м/сек
Дымовая труба:	
– температура	130°С
– скорость движения газов	менее 2 м/сек

Принятые в таблице 20 (ГОСТ 2127-47) скорости движения газов в дымовых каналах намного превышают установленные и, видимо, ошибочные противопожарные нормы 0,15– 0,60 м/сек (НПБ 252-98), отвечающие ламинарному течению. Обращаем также внимание на крайне низкие значения принятых тепловых нагрузок, явно отвечающие чисто конвективной теплопередаче. Так, при температуре топливника 1000°С лучистые тепловые потоки при заполнении всего объема топливника