

пламенем составили бы на стенке не менее 20 кВт/м². Это подтверждает, что принятая в стандартном расчёте концепция отвечает низкопламенному горению в условиях больших избытков воздуха.

В заключение отметим, что оптимальная температура внешних сторон стенок печи 70⁰С (отвечающая паспортной теплоотдаче 0,5 кВт/м²) соответствует температуре внутренних сторон стенок кирпичной печи (толщиной в полкирпича) всего 170-200⁰С (что следует из уравнения теплопроводности для полностью прогретой стенки). Это зачастую обескураживает дачника. Ведь топят печь, казалось бы, до куда более высоких температур внутри, по крайней мере, в топливнике. А дело в том, что за время топки внутренняя сторона стенки успевает прогреваться изнутри (от огня) на глубину всего 5-7 см (но до высокой температуры 500-700⁰С). И только через час после топки тепло изнутри «выбирается по кирпичу наружу», и за это время внутренняя сторона стенки постепенно охлаждается до 200⁰С. Численные оценки по уравнению нестационарной теплопроводности (стр.233-235) подсказывают, что кирпичную стенку печи («скорлупу», зачастую декоративную) вопреки многовековой практике не целесообразно использовать в качестве теплонакопительной. Специальный высокотеплоемкий теплонакопительный сердечник (ядро с дымовыми каналами внутри) лучше изготавливать отдельным узлом из высокотеплопроводного материала и облицовывать его внешней декоративной кладкой (или штукатуркой) с зазором. Такая новая технология изготовления дровяных отопительных печей уже используется в США и в Финляндии, в России освоена в ООО «Ками» (С.И.Серегин). При использовании новых материалов такая технология за счет высокой теплоемкости ядра позволит обеспечить практически неизменный уровень теплоотдачи печей в межпротопочный период, отказаться от сложных в изготовлении многооборотных схем теплосъема, а также перейти к комплектации печей крупными узлами заводского изготовления.

5.7.4. Внутренняя аэродинамика печей

Часто в быту полагают, что дымовая труба нужна в печи только для того (или прежде всего для того), чтобы выводить из печи дым так, чтобы он не попал в помещение. Но ведь печь - это не устройство для производства дыма, а аппарат для выработки тепла. Так что сам по себе дым в печи – это вторичный и второстепенный фактор-следствие.

Главное в печи – это то, что в ней горят дрова. И труба нужна печи в первую очередь для того, чтобы побуждать (создавать) в печи непрерыв-

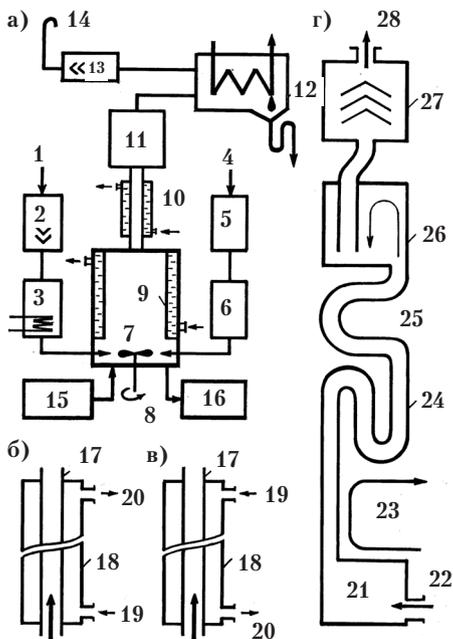


Рис. 110. Принципиальные схемы теплогенераторов и теплообменников: а – обвязка теплогенератора, б – спутный теплообменник, в – противоточный теплообменник, г – способы «удлинения» теплообменника в смысле увеличения теплопередающей способности. 1 – забор воздуха, 2 – нагнетатель воздуха (вентилятор, компрессор, насос), 3 – нагреватель и дозатор воздуха, 4 – доставка топлива, 5 – хранение, накопление и подготовка топлива, 6 – дозированная подача топлива, 7 – камера сгорания (топка, топливник, горелка), 8 – смеситель воздуха и топлива, 9 – теплосъёмное устройство в топливнике (теплообменник, охладитель), 10 – основной теплообменник (охладитель продуктов сгорания – дымовых газов), 11 – очиститель дымовых газов (пылеосадитель, фильтр), 12 – конденсирующее теплосъёмное устройство (охладитель) с полезным использованием (рекуперацией) тепла, 13 – отсасыватель воздуха (вентилятор, насос, компрессор), 14 – сброс дымовых газов в атмосферу, 15 – подвод

поджигающего топлива, 16 – вывод твёрдых продуктов сгорания, 17 – дымовая (жаровая) труба, 18 – кожух (может быть, и гипотетический), 19 и 20 – ввод и вывод теплосъёмного агента, 21 – теплогенератор, 22 – ввод воздуха, 23 – циркуляция теплосъёмного агента (воздуха), 24, 25, 26 и 27 – вертикально-оборотный, горизонтально-оборотный, колпаковый, секционный теплообменники, 28 – вывод охлаждённых продуктов сгорания.

ное течение газов (свежего воздуха, подводящего кислород к зоне горения, и дымовых газов, отводящих из зоны горения продукты сгорания). Причем, продукты сгорания – это самое полезное в печи, поскольку именно они содержат то тепло, ради которого и жгут дрова. Но охлаждённые (после отбора тепла) продукты сгорания (дымовые газы) конечно лучше выводить за пределы бани, минуя помещение, но уже только в целях улучшения санитарно-гигиенической обстановки.

Если бы горячие дымовые газы не поднимались вверх, освобождая пространство для притока свежего воздуха, то костры, камины и печи могли бы существовать лишь при искусственном создании потока воздуха, например, механическим вентилятором. В самом общем случае схема теплогенератора включает в себя в первую очередь побудители воздушного потока (рис. 110). В промышленных теплогенераторах в качестве

побудителей чаще применяют механическую (принудительную) тягу, в бытовых теплогенераторах – чаще естественную (гравитационную). Как и в случае гравитационной вентиляции естественная тяга в трубах возникает из-за того, что вес столба газа внутри трубы отличается от веса столба газа снаружи, в результате чего появляется разность (перепад) давлений Δp_T внутри и снаружи (рис. 42). Эти перепады давления и называются тягой.

Тяга (напор) зависит только от высоты трубы и температуры дымовых газов. В обычных условиях тяга печных (банных и дачных) труб не превышает 5–20 Па. Это очень малая величина, отвечающая 0,5–2 мм водяного столба (что требует для измерения особых приборов-тягометров). Если внешние ветровые напоры $\Delta p_v = \rho V_0^2 / 2$ окажутся больше тяги, то ветер может «задуть» в трубу, изменив направление движения дымовых газов на противоположное, то есть вниз («опрокидывание» тяги). Чтобы этого не случилось, дымовую трубу делают повыше, но всё равно в реальных условиях тяга не превысит величин порядка 50 Па. Поэтому при острой необходимости трубу оборудуют дефлектором (см. раздел 4.1.5).

Под действием тяги в топке печи возникает поток воздуха, переходящий в поток дымовых газов в дымовой трубе. Часто в быту «тягой» называют величину этого газового потока. Так, говорят, что в печи плохая «тяга», если пламя спички (свечи, лучины), помещённое у воздухозаборного отверстия (поддувального), отклоняется в сторону топливника слабо. Иногда тягой называют и само явление движения газов в печи. Более того, иногда (не только дачники, но и печники, и даже пожарники) ошибочно считают, что движение газов возникает в любой даже холодной трубе всегда в силу её большой высоты только за счёт перепадов гравитационного давления в ней.

В дальнейшем мы под тягой будем понимать исключительно величину перепада давлений на замкнутой траектории, проходящей из поддувала через всю печь (и трубу) и обратно по атмосфере вне печи вновь в исходную точку поддувала (то есть разницу весов столбов газов внутри и снаружи печи). Величина же линейной скорости (и величина объёмного или массового расхода) газа будет определяться затем исходя из величины тяги и величины газодинамического сопротивления всего тракта печи в целом (см. раздел 5.7.10).

Перепад давления Δp_T (тяга в дымовой трубе) расходуется, во-первых, на газодинамические разгоны и торможения воздуха, на смены направлений движения воздуха и завихрения (то есть на инерционные процессы в газовых потоках), а во-вторых, на поддержание достигнутых скоростей в условиях наличия сопротивлений трения (сил вязкости при движении

газов в дымоходах): $\Delta p_{г} = (\xi_{м.с.} + \xi_{тр}) \rho V^2 / 2$, где $\xi_{м.с.}$ – коэффициент местных газодинамических сопротивлений, $\xi_{тр}$ – коэффициент сопротивления трения, V – средняя линейная скорость газового потока, ρ – плотность воздуха (или дымовых газов) в месте течения. Коэффициенты сопротивления зависят от того, какой режим (турбулентный или ламинарный) течения воздуха в воздухозаборных отверстиях (и дымовых газов в дымоходах) реализуется в конкретной конструкции печи.

Ранее мы уже отмечали, что НПБ 252-98 предписывает исключительно ламинарный режим течения дымовых газов в дымоходах со скоростями (0,15–0,60) м/сек. В то же время в реальных условиях в дымоходах печей (и даже каминов) достигаются скорости дымовых газов до 4 м/сек, что отвечает турбулентному режиму истечения дымовых газов. Действительно, в противоречии НПБ 252-98 имеется три нормативных документа, устанавливающих иную скорость движения газов в дымовых трубах. Во-первых, это уже упоминавшийся ГОСТ 2127-47.

Во-вторых, ГОСТ 9817-95 предписывает не менее 8 см² площади поперечного сечения (прохода) дымовой трубы на каждый киловатт номинальной (полезной) мощности печи. Справедливость требует отметить, что ГОСТ 9817-95 формально относится только к бытовым аппаратам с водяным контуром. Тем не менее за отсутствием других нормативов печники ориентируются на этот стандарт и для банных печей (хоть и нарушают его повсеместно). Учитывая, что получение 1 кВт номинальной мощности требует сжигания 0,5 кг/час дров (при коэффициенте полезного действия 50%), нетрудно подсчитать, исходя из стехиометрических коэффициентов (см. раздел 5.7.2), что на каждые 8 см² дымовой трубы должно приходиться не более 3,5 кг/час дымовых газов. Это значит, что расход дымовых газов не должен превышать нормируемого значения 0,12 г/см²-сек в расчёте на 1 см² дымовой трубы. При температуре газов в дымоходе 300°С (и соответственно плотности дымовых газов 0,6 кг/м³) номинальная линейная скорость газов составит 2 м/сек.

В-третьих, СНиП 41-01-2003 нормирует сечение дымовых труб и каналов в зависимости от тепловой мощности печи (то есть теплоотдачи теплоёмкой кирпичной печи): 140×140 мм при тепловой мощности до 3,5 кВт, 140×200 мм при тепловой мощности от 3,5 кВт до 5,2 кВт, 140×270 мм при тепловой мощности печи от 5,2 кВт до 7 кВт. Предполагается, что теплоёмкая печь выдаёт указанную тепловую мощность 24 часа в сутки, но топится она всего лишь 2–3 часа в сутки. Значит, тепловая нагрузка топливника (полезная мощность выделения тепла в топливнике при горении дров) при протопке будет превышать примерно в 10 раз уровень теплоотдачи печи в течение суток. Простой пересчёт даёт в этом случае значение нормируемого сечения дымовых каналов на уровне 6 см²

на 1 кВт номинальной мощности, что примерно согласуется с требованиями ГОСТ 9817-95.

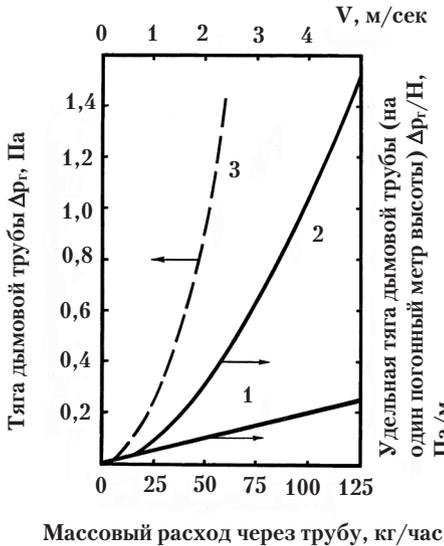


Рис. 111. Расчётные расходные характеристики дымовой трубы сечением 0,12x0,12 м («в полкирпича»), высотой H , с температурой, плотностью и кинематической вязкостью дымовых газов 400°C , $0,5 \text{ кг/м}^3$ и $0,4 \text{ см}^2/\text{сек}$ соответственно: 1 — зависимость массового расхода дымовых газов G (нижняя шкала) или линейной скорости движения дымовых газов V (верхняя шкала) от удельной тяги в предположении наличия лишь сил трения при ламинарности дымового потока $\Delta p_T = (64H/d \cdot \text{Re}) \rho V^2 / 2$ (при V менее $0,5 \text{ м/сек}$); 2 — то же, но при турбулентности дымового потока $\Delta p_T = (0,31H \cdot \text{Re}^{-0,25}/d) \rho V^2 / 2$ (при V более 1 м/сек); 3 — то же, но в предположении наличия лишь местных газодинамических сопротивлений (завихрений в конкретном месте) $\Delta p_T = \xi_{\text{м.ср}} V^2 / 2$ при условном значении $\xi_{\text{м.с}} = 1$.

Таким образом и ГОСТ 9817-95 и СНиП 41-01-2003 допускают линейные скорости газов в дымовых трубах на уровне до 2 м/сек (а при реальном коэффициенте избытка воздуха, равном 2 , до 4 м/сек). При такой скорости поток дымовых газов ламинарен ($\text{Re} < 2200$) в крайне редко применяемых (из-за забивок) трубах диаметром до 6 см (до номинальных мощностей печей до $3-4 \text{ кВт}$) и турбулентен в трубах большего диаметра, применяемых при больших номинальных мощностях печей. Учитывая, что современные отечественные и финские банные металлические печи с короткими металлическими гладкими трубами изготавливаются из расчёта $2-6 \text{ см}^2$ сечения трубы на 1 кВт номинальной мощности, можно заключить, что на начальном этапе растопки газы в трубе могут двигаться ламинарно, однако при разгорании таких печей газовые течения неминуемо переходят в турбулентный режим.

В ламинарном режиме имеем $\xi_{\text{м.с}} = 30/\text{Re} + \xi_{\text{кв}}$, и $\xi_{\text{тп}} = 64H/d \cdot \text{Re}$, где Re — число Рейнольдса, $\xi_{\text{кв}} = 1,5$ для случая двух местных сопротивлений

эскиз	ξ	эскиз	ξ	
	1,0		1,0	
	0,5		0,2	
	1,1		0,2	
	4,4		0,5	
	2,0		0,55	
	ξ		ξ	
	0	0,50	0	1,0
	0,1	0,45	0,1	0,81
	0,3	0,35	0,3	0,49
	0,5	0,25	0,5	0,25
	0,7	0,15	0,7	0,09
	1,0	0,0	1,0	0,0

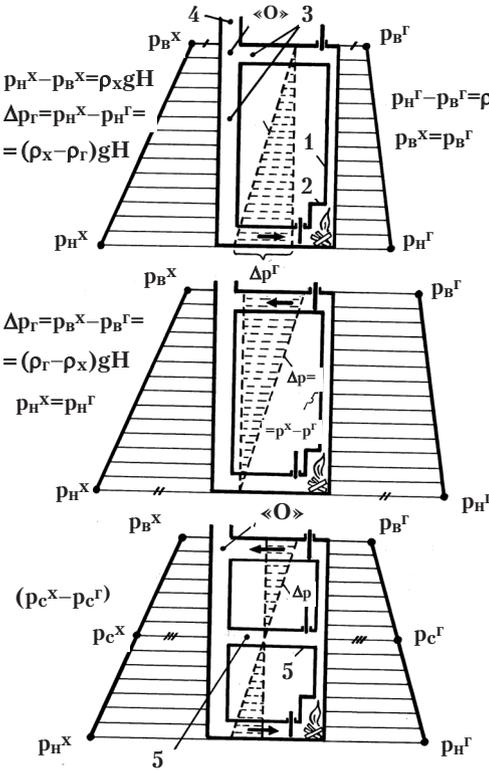
Таблица 21. Численные значения коэффициентов местных газодинамических сопротивлений, отнесённых к скорости изотермического воздуха V в точке, отмеченной стрелкой.

(завихрений) при выходе из хайла в трубу и из трубы в атмосферу (см. например, О.Н. Брюханов и др., Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики, М.: Инфра-М, 2004 г.). При малых скоростях $V < 0,5$ м/сек (отвечающим малым числам Рейнольдса $Re < 1000$ на этапе растопки печи) силы трения оказываются определяющими, и массовый расход дымовых газов равен $G(\text{кг/сек}) = \pi d^4 \Delta p_r / 128 N \nu$. Поскольку Δp_r пропорционален высоте трубы H, то G вовсе не зависит от высоты трубы: чем выше труба, тем больше тяга, но тем больше и сопротивление трения. В этом режиме расход очень быстро (пропорци-

онально d^4 уменьшается с уменьшением диаметра трубы, так что расход очень чувствителен к положению задвижки на дымовой трубе.

В режиме турбулентного течения при $V > 1$ м/сек имеем $\xi_{\text{тр}} = 0,31 \cdot H \cdot Re^{-0,25} / d$, $\xi_{\text{м.с.}} = 1,5$ также для случая двух местных сопротивлений (завихрений) при выходе из хайла в трубу и из трубы в атмосферу. Как правило, при низких трубах (менее 5 м) силы трения оказываются незначительными, и расход дымовых газов составляет $G = (\pi d^2 / 4) (\rho \Delta p_r)^{1/2}$ (рис. 111)

Для оценочных расчётов печей иногда применяют упрощённое соотношение $\Delta p_r = (\rho_x - \rho_r) g H = (\xi + \lambda H / d) \rho V^2 / 2 = (\xi + \lambda H / d) G^2 / \rho S^2$, где λ – коэффициент трения, равный 0,015 для металлических труб; 0,03 для оштукатуренных кирпичных труб и 0,04 для неоштукатуренных кирпичных труб; $G(\text{кг/сек})$ – секундный массовый расход дымовых газов; $S = \pi d^2 / 4$ – площадь сечения трубы. Коэффициент местных газодинамических сопротивлений ξ рассчитывается как сумма значений по таблице 21. Так, например, печь-шведка с отопительным щитком (рис. 101в), имеет три разворота с $\xi = 2$ каждый, один вход воздуха с $\xi = 1$, один поворот с $\xi = 1,1$ и один выход дымовых газов с $\xi = 1$, что в сумме составляет $\Sigma \xi = 9,1$. Если открыть летний дымоход 5, то суммарный коэффициент сопротивления снизится до $\Sigma \xi = 4$ (расход воздуха через печь повысится). Коэффициент



а) Рис. 112. Эпюры (высотные распределения статических давлений в невозмущённой атмосфере (слева) и в гипотетической печи с дымовой трубой (справа) без потоков газа, но с плотностью горячих газов в печи ρ_r меньшей, чем плотность холодного воздуха в атмосфере вне печи ρ_x : а – при полностью открытой задвижке сверху и закрытой задвижке снизу, то есть при открытом устье трубы и при закрытой дверке печи и поддувала («печная эпюра»), б – при закрытой задвижке сверху и открытой задвижке снизу («каминная эпюра»), в – при закрытых задвижках сверху и снизу и открытой задвижке на гипотетическом срединном газоходе 5. Н – высота трубы.

газоходы, имитирующие внешнюю воздушную атмосферу, 4 – гипотетический газоход, имитирующий воздействие (давление) вышележащих слоёв атмосферы (аналог расширительного бака, напорной ёмкости, стояка), 5 – гипотетический срединный газоход. Стрелками показано направление движения газов при открытии задвижек.

же сопротивления трения кирпичных дымоходов длиной 10 м проходным диаметром 0,12 м составляет $\lambda H/d=3$, то есть обычно меньше коэффициента местных газодинамических сопротивлений и снижается при расширении дымовых каналов. Поэтому очень важно добиваться снижения именно местных газодинамических сопротивлений, например, скруглением поворотов и разворотов, плавным расширением (в том числе и оголовка дымовой трубы) и постепенным сужением газоходов (И.Е. Идельчик, Справочник по гидравлическим сопротивлениям, М.: Машиностроение, 1975 г.).

Часто бытовые печники рассматривают печь упрощённо как комбинацию входного и выходного отверстий. Считается, что если сопротивление входного отверстия мало, а выходного велико, то воздух войти в печь

может в достаточном количестве, а вот выйти в виде дымовых газов уже не в состоянии, поскольку труба его «не выпускает». В результате печь начинает дымить.

Конечно, такой интуитивный анализ хоть по результату верен, но не точен по сути, так как если газ не может выйти, то он и не входит. Кроме того, в популярной литературе обычно ограничиваются самым общим утверждением, что, мол, надо добиваться того, чтобы тяга превышала сумму сопротивлений. В противном случае, якобы, печь будет дымить. Но дело в том, что сумма сопротивлений всегда в точности равна тяге, поскольку скорость газов автоматически увеличивается сама собой до тех пор, пока сумма сопротивлений трения и газодинамических сопротивлений не сравняется с тягой. Тем не менее, печь может то дымить из всех щелей, то всасывать воздух во все щели.

Для наглядности представим схему взаимодействия печи с атмосферой в виде замкнутого контура, аналогичного контуру водяного отопления, но заполненного не водой, а воздухом и дымовыми газами (рис. 112). Правое колено представляет собой печь 2 с трубой 1, заполненной горячими дымовыми газами. Левое колено имитирует воздушную атмосферу вне печи и представлено в виде вертикальных и горизонтальных каналов 3 с низким газодинамическим сопротивлением.

Рассмотрим сначала статическую картину при отсутствии течения газов, то есть будем считать, что левое колено контура заполнено холодным неподвижным воздухом с плотностью ρ_x , а правое колено (печь с трубой) заполнено неподвижным горячим дымовым газом с плотностью ρ_r (индекс «х» означает холодный, а «г» – горячий).

Если оголовок дымовой трубы открыт (а дверка печи закрыта, чтобы не создавался поток газов в трубе), то статическое давление на высоте оголовка Н в трубе $p_{вг}$ и в атмосфере $p_{вх}$ равны между собой. Сами давления $p_{вг}=p_{вх}$ создаются давлением вышележащих слоёв воздуха, имитируемых каналом 4 (рис. 112а). А вот на уровне пода печи в этом случае давление в атмосфере $p_{нх}$ выше давления в печи $p_{нг}$, поскольку дымовые газы легче атмосферного воздуха (индекс «н» означает нижний, «в» – верхний). Более того, давление в трубе везде ниже атмосферного на том же высотном уровне (см. эпюру $\Delta p = p^x - p^r$). Поэтому, приоткрывая дверку печи, мы обнаружим поток воздуха, всасываемый в печь (см. чёрную стрелку, направленную к закрытой нижней задвижке печи). Это значит, что если в печи в любом месте сделать отверстие (дырку, щель), то воздух будет всасываться в это отверстие, причём тем сильнее, чем ниже располагается отверстие.

Теперь закроем оголовок трубы верхней задвижкой и откроем дверку топливника нижней задвижкой (рис. 112б). Движение газа через печь

в этом случае также будет отсутствовать, но теперь равны между собой давления в атмосфере p_n^x и в печи p_n^r на уровне пода (то есть не наверху, а внизу контура). Поэтому, приоткрывая задвижку на оголовке трубы, мы обнаружим, что дымовые газы вырываются наружу. Это значит, что из отверстия в печи в любом месте дым будет истекать наружу, причём тем сильнее, чем выше располагается отверстие.

В реальной ситуации в печи открыты и оголовки трубы, и дверка топливника печи (или дверка поддувала). В этом случае (в точности как и на рисунке 42 для вентсистемы) мы можем ожидать, что должна реализовываться какая-то промежуточная схема, когда наверху давление в трубе p_v^r больше, чем давление в атмосфере p_v^x , чтобы дым уходил из оголовка трубы, а внизу наоборот, давление в печи p_n^r меньше, чем давление в атмосфере p_n^x на том же высотном уровне, чтобы воздух всасывался через поддувало (рис. 112в). В статическом случае (при исчезающе малых потоках газа) такое распределение давлений будет достигнуто, если верхнее и нижнее отверстия лишь чуть-чуть приоткрыты. Характерной особенностью такого распределения статических давлений является наличие некоего нейтрального высотного уровня, на котором давление в атмосфере p_c^x равно давлению в трубе p_c^r . На этом высотном уровне в трубе можно сделать даже крупную дырку (имитирующую гипотетическим каналом 5 на рис. 112в), и воздух в неё всасываться не будет точно так же, как дымовые газы не будут выходить. Эта дырка называется «разрывом» дымовой струи и фактически реализуется в зонтах и русских

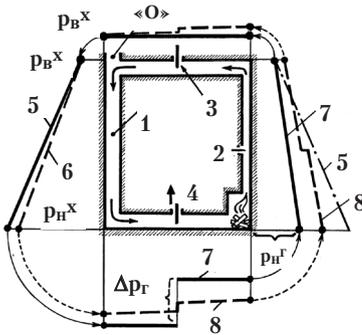


Рис. 113. Эпюры (круговые распределения) статических давлений в замкнутом контуре, составленном из воздушной атмосферы (слева) и печи с дымовыми газами (справа): 1 – колено (канал) контура, имитирующей воздушную атмосферу, 2, 3 и 4 – гипотетические задвижки, имитирующие дверку поддувала, переход от печи к трубе и оголовка трубы, 5 – распределение статического давления (воздушного напора) в невозмущённой неподвижной атмосфере $p_x = \rho_x g h$, где h – высота атмосферы над рассматриваемой точкой, 6 – распределение статического

давления в атмосфере с учётом потерь давления за счёт сил трения при наличии нисходящих потоков воздуха (показано для иллюстрации факта снижения давления, реальные абсолютные значения снижения давления ничтожно малы, и прямые 5 и 6 практически совпадают), 7 – распределение статических давлений в неподвижных дымовых газах внутри печи, 8 – распределение статических давлений в подвижных дымовых газах внутри печи с учётом падений давлений за счёт местных гидродинамических сопротивлений гипотетических задвижек. Остальные обозначения те же, что и на рис. 112.

печах (рис. 99). Используется она и в конструкциях газовых водогрейных бытовых котлов с естественным потоком воздуха (например, типа АОГВ) для того, чтобы случайные эпизодические сильные порывы ветра сверху не достигали газовой горелки и не тушили её, а безвредно уходили через эту дырку в помещение котельной. Вместе с тем понятно, что через эту дырку может выходить дым, а входить атмосферный воздух так, чтобы результирующий массовый газовый поток был равен нулю. В этом случае для исключения дымлений эту дренажную дырку надо располагать пониже и прикрывать подвижной дверкой, распахивающейся лишь при порывах ветра. В случае дровяных печей местоположение нейтрального высотного уровня всё время меняется в ходе протопки, так что полезно использовать отверстия в трубе (в том числе ниже нейтрального высотного уровня) в бытовых условиях не удаётся.

Теперь перейдём от статической высотной схемы давлений (без газовых потоков) к динамической схеме, когда воздух постоянно входит в печь, а дымовые газы постоянно выходят из трубы. В таком случае замкнутый контур (см. рис. 112) превращается в циркуляционный (рис. 113). Эпюра давлений при наличии движения газа усложняется тем, что должно учитываться снижение статических давлений за счёт сопротивлений из-за трений, а также за счёт завихрений, создающих так называемые местные газодинамические сопротивления.

Прежде всего отметим, единственной базисной точкой отсчёта статических давлений может быть только точка, непосредственно располагаемая в невозмущённой воздушной атмосфере. Как и ранее, такую точку «О» будем выбирать наверху контура, и статическое давление в этой точке мы будем обозначать p_v^x и принимать равным весу (напору) невозмущенного воздушного столба над этой точкой. Ни при каких потоках газов в циркуляционном контуре численное значение величины давления p_v^x измениться не может. Более того, вообще говоря, крайне мало изменяется и распределение давлений 5 в левом колене 1 контура, имитирующего состояние воздушной атмосферы вне печи. Тем не менее, для общности анализа все же учтем, что и в атмосфере при разжигании печи наблюдаются некоторые снижения давления по направлению газового потока из-за сил трения или завихрений. Это отразится в том, что прямая распределения давлений в подвижном, спускающемся вниз воздухе 6 расположится ниже прямой распределения давлений в неподвижной атмосфере 5 (последняя совпадает с прямой ($p_{н^x} - p_v^x$) на рисунке 112). Причём с понижением высотного уровня прямые распределений давлений 5 и 6 всё больше расходятся из-за потерь на трения и завихрения. Но ещё раз подчёркиваем, что ввиду громадных объёмов атмосферы (по сравнению с объёмом печи) отличия прямых 5 и 6 в реальных усло-

ния. На рис. 113 принято условно, что местные газодинамические сопротивления создаются в местах установки задвижек 2, 3 и 4. Скачкообразные падения давления в местах газодинамических сопротивлений – это, конечно же абстракция, поскольку реальные завихрения (турбулентности) распространяются на много калибров (диаметров) дымового (или воздушного) канала вниз по течению газа. Впоследствии этого, местные газодинамические сопротивления «размазаны» и создают плавно спадающие давления (как и силы трения), но для наглядности и качественного восприятия газодинамических явлений всё же будем придерживаться условной концепции скачкообразных перепадов (снижений) давления в местах газодинамических сопротивлений. Вместе с тем, любые развороты дымовых потоков, создающие завихрения и местные газодинамические сопротивления, увеличивают скорость движения газов в вихрях, а потому увеличивают коэффициент конвективной теплопередачи. Поэтому при анализе теплопередачи считать перепады давления скачкообразными нельзя.

Сопоставляя высотные распределения давлений 7 и 8, можно сделать лишь один вывод: давление внутри печи и трубы при открытии задвижки 4 увеличилось (разрежение снизилось). Полезной информации это заключение не даёт. Но если сопоставить высотное распределение давления 8 в работающей печи с высотным распределением давления в атмосфере 5 (перенесённым слева на правое колено контура и обозначенным штрихпунктирной линией 5), то получим практически важный вывод (хотя и умозрительно, и интуитивно предсказуемый): в нижней части печи воздух всасывается в печь через любое отверстие, а в верхней – дымовые газы стремятся выйти из печи и трубы через любое отверстие (в первую очередь через оголовок трубы).

Для более детального экспресс-анализа удобна следующая методика (рис. 114). Распределения давлений в печи не могут выйти за пределы базисных уровней $p_{в}^x$ и $p_{п}^x$, задаваемых состоянием атмосферы на уровнях оголовка трубы и пода печи и изображённых штрихпунктирными прямыми 2. Более того, реальные распределения давлений в печи не могут выйти за пределы уточнённых базисных уровней 3 (диштрихпунктирных линий), построенных с учётом статических давлений, создаваемых напором горячих газов в печи. Задаваясь некими значениями коэффициентов трения и местных сопротивлений, рассчитываем, как и прежде, по их сумме скорость транзитного газового потока по известной тяге Δp_r , после чего рассчитываем реальное распределение давлений 4. Например, в простейшем случае безоборотной печи с нулевым коэффициентом трения и четырьмя местными газодинамическими сопротивлениями (поддувальным отверстием 5, переходом из печи в трубу 6, задвижкой в откры-

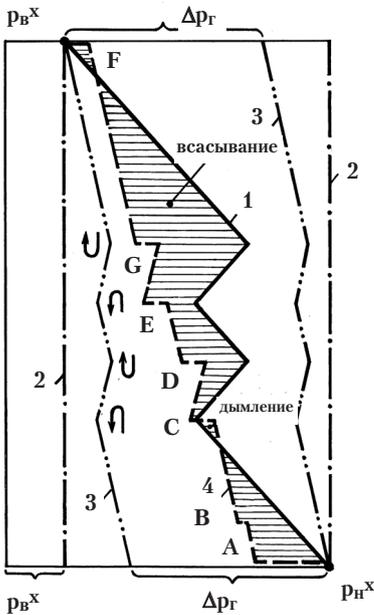


Рис. 115. Эпюры (распределения вдоль дымоходов) давлений в печи с двухоборотной дымовой трубой (двухоборотным дымоходом). Обозначения те же, что и на рисунке 114. Буквы на эпюре соответствуют точкам на рис. 116а.

том состоянии 7, оголовком трубы 8) имеем распределение давлений 4 в виде ломаной прямой с четырьмя локальными перепадами давления. Эта ломаная кривая 4 вьется вокруг прямой ($p_{в}^x - p_{н}^x$), которая отвечает теоретически максимально возможному расходу газов через печь (в отсутствии сопротивлений) и которая характеризуется отсутствием разниц давления внутри и вне печи (что наблюдается при свободноконвективном течении дымовых газов - при отсутствии контакта со стенками трубы).

Как и прежде, зоны разрежений возникают непосредственно после мест газодинамических сопротивлений, а зоны избыточных давлений (дымлений) возникают перед местами газодинамических сопротивлений. Напомним, что подобные разрежения имеют место и в случае течения жидкостей. Так, в разрежения перед циркуляционным насосом часто подсасывается атмосферный воздух в отопительную магистраль. В зоны разрежения после заужений трубопровода вводят в поток воды пузырьки воздуха для гидромассажных ванн.

Высоты ступенек (величины перепадов давления) на распределении 4 увеличиваются с увеличением величин конкретных местных газодинамических сопротивлений и с увеличением

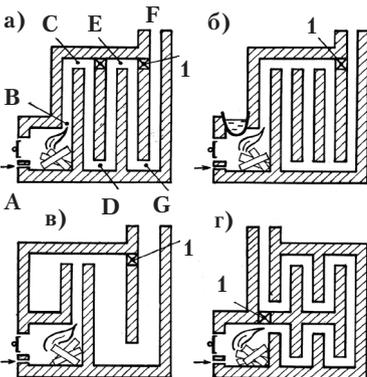


Рис. 116. Принципиальные схемы дымооборотных печей: а - двухоборотная (буквы соответствуют точкам на эпюре 115), б - однооборотная с трёхканальным нисходящим коленом, в - противоточная (псевдоколпаковая), г - четырёхоборотная двухъярусная с преимущественным нижним прогревом. 1 - летние дымоходы (каналы, открывающиеся задвижками при растопке холодной печи для прогрева дымовой трубы и создания тяги).

квадрата скорости газового потока. Но сумма высот ступенек всегда остается величиной постоянной. Поэтому любой задвижкой можно регулировать величину перепадов давления во всех узлах печи. Так, снижать скорость подачи воздуха в печь (то есть снижать мощность печи) можно и дверкой поддувала (повышая разрежение в топке), и задвижкой на трубе (снижая избыточное давление в оголовке трубы и предотвращая тем самым пожароопасное дымление на чердаке и в перекрытиях, но снижая при этом разрежение в топке и вызывая возможность ее дымления).

При малой тяге может оказаться существенным перепад давления на оголовке дымовой трубы - истекающая в свободное пространство струя дыма увлекает за собой большие массы атмосферного воздуха и тормозится при этом сама, повышая давление в дымовой трубе. Чтобы снизить такое газодинамическое сопротивление необходимо устранить подсос атмосферного воздуха в струю дыма, для чего оголовок трубы необходимо делать расширяющимся с полууглом не более 20 градусов (рис. 49). В Западной Европе плавно расширяющиеся оголовки старинных кирпичных дымовых труб встречаются часто, особенно для английских каминов. В дачных печах и каминах расширения дымовых труб не распространены.

На рисунке 115 по методике рисунка 114 анализируется работа двухоборотной печи. В качестве вертикальной пространственной координаты на рис. 115 принята не высота по трубе, а расстояние от поддувала до оголовка трубы вдоль дымовых каналов (рис. 116а). Характерным отличием этой схемы является наличие участков с возрастающим статическим давлением вдоль по потоку газов. Такая ситуация зачастую приводит к недоразумениям, поскольку считается, что газ должен двигаться в сторону низких давлений. Поэтому печники часто полагают, что нисходящее колено дымооборота якобы плохо пропускает дымовые газы, поскольку приходится преодолевать «противодавление», вследствие чего на практике нисходящие дымоходы делают пошире, в том числе, за счет многоканальности - устройства двух-пяти параллельных нисходящих каналов (рис. 116б). Тем самым фактически стремятся реализовать известную противоточную теплообменную камеру (рис. 116в) с восходящим узким потоком газа по центру и нисходящими широкими потоками газа на периферии вдоль стенок канала.

Вопреки вышеуказанному расхожему мнению, в факте повышения статического давления вдоль по потоку на рисунке 115 ничего необычного нет. Всё дело в том, что в нисходящих дымоходах газ движется с торможением за счет повышения статического давления («противодавления»), но в то же время с ускорением за счет «подталки-

ваний» вниз весом самого газа ρgh (а этот вес в точности равен «противодействию» по самому определению понятия статических давлений). При движении вверх газ вынужден «поднимать» свой вес (за счёт снижения статического давления), а при движении вниз газ «опускает» свой вес. Сопоставлять давления можно только на одном высотном уровне. В ответ на это иногда возражают и говорят, что, мол, во всех дымоходах лёгкий дым «сам собой» устремляется вверх, а вот в нисходящих дымоходах «вынужден с усилием» опускаться вниз. Но ведь можно сказать, что в нисходящем дымоходе дым более холодный (а значит, и более тяжёлый), чем в предшествующем восходящем дымоходе, а значит должен «сам собой» проваливаться вниз. Дымооборот – это просто сообщающиеся сосуды. Появление движения газа в одном сосуде (колене) автоматически вызывает движение газа в другом сосуде (колене). Никого ведь не смущают волны на шланге (с расположением шланга то выше от земли, то ниже), по которому течёт вода из бака на эстакаде в бочку на земле: возникающие колена пропускают воду практически точно так же, как и идеально ровный горизонтальный водопроводный шланг.

Так или иначе, сам факт наличия подъёмов и спусков дымовых каналов не влияет на газодинамическое сопротивление газоходов иначе как за счёт увеличения длины газохода и наличия завихрений в местах поворотов (подверток внизу и перевалов наверху). При этом широкие параллельные спуски (рис. 116б) имеют меньшее гидродинамическое сопротивление (из-за пониженной скорости течений). При хорошей тяге оправданы многоярусные вертикальные дымообороты (рис. 116г) и горизонтальные дымообороты (рис. 108), которые способствуют прогреву средних частей печи.

Из методики построения графиков на рисунке 115 следует, что всё многообразие кривых 4 (располагаемых между линиями 3) соответствует различным соотношениям местных газодинамических сопротивлений. Одновременное же снижение (или повышение) всех без исключения коэффициентов сопротивлений приводит к пропорциональному увеличению (снижению) квадрата скорости газов (или квадрата массового расхода газов), но не изменяет взаимного расположения кривых 1 и 4 (даже не изменяет самой линии 4). То есть, если печь дымила из всех щелей в какой-то пространственной зоне, то после одновременного снижения всех без исключения сопротивлений, она будет дымить точно так же, как и раньше. С другой стороны может случиться так, что при снижении некоторых сопротивлений (например, тщательным скруглением поворотов первого дымохода) печь вдруг начинает дымить ещё больше через задвижки летнего хода, хотя общий расход газов через печь явно возрос. Как раз для таких случаев анализ аэродинамики сложных дымооборот-

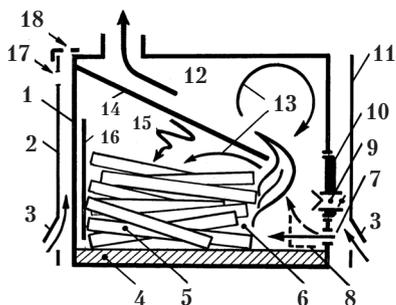


Рис. 117. Принципиальная схема металлической печи с горизонтальным дымооборотом: 1 – корпус топливника, 2 – экран (кожух) печи, 3 – воздухозаборные отверстия для калорифера, образованного стенками корпуса печи и экрана печи, 4 – под печи из огнеупорного кирпича, 5 – поленья, 6 – зона переднего (бокового, верхнего, поверхностного) горения, 7 – воздухозаборное отверстие, подающее воздух непосредственно в зону горения, 8 – дополнительно устанавливаемый на под стальной уголок,

отклоняющий поток воздуха из воздухозаборного отверстия, 9 – главное воздухоподающее отверстие (труба) с вращающейся (поворотной) заслонкой и рассекателем воздуха, 10 – дверка топливника, открывающаяся для закладки дров, 11 – передний распахивающийся экран, 12 – основной (вытяжной) поток дымовых газов, 13 – циркуляционный поток дымовых газов, 14 – горизонтальный (лучше наклонный для удобной чистки от пепла и сажи кочергой из дверки топливника) дымооборот из стального листа, 15 – лучистый поток с поверхности дымооборота (свода), подогревающий горячие дрова, 16 – раскалённый экран (лист-жаровня) для подогрева дров лучистым теплом, 17 – отверстия (для вывода горячего воздуха) в накладке, прикрывающей калориферный зазор, 18 – отверстия (для ввода горячего воздуха) в верхних зонах экрана (кожуха).

ных печей по методике рис. 115 может оказаться наиболее интересным и плодотворным, поскольку позволит выяснить, какие сопротивления надо сокращать, а какие никакой роли не играют.

Помимо оценок транзитного приточно-вытяжного расхода газов через печь, в рамках аэродинамического анализа необходимо более детально взглянуть и на картину циркуляционных явлений в печи. Дело в том, что на строго направленный поток газов в печи накладываются различного рода противотоки: инерционные, связанные с турбулизацией потоков, и гравитационные, обусловленные тем, что более холодные объёмы газов «тонут» в более тёплых объёмах газов.

Топливник (топка) представляет собой камеру, в которой горит костёр. Это значит, что воздушные потоки в топливнике формируются примерно также, как в чёрной бане: циркуляционные потоки 4 сочетаются с вытяжными потоками 5 (рис. 108). Именно эти циркуляционные задымлённые потоки 4 приводят к дымлению 8 при распахивании дверки топливника. Циркуляционные потоки в топливнике очень важны. Поскольку размер костра сравним с размером топливника, кратность циркуляции дыма может достигать тысяч раз в час. Если бы нисходящих циркуляционных потоков не было, то стены топki при растопке нагревались бы только лучистым теплом, поскольку дымовые газы сразу бы удалялись в дымоходы. Поэтому чем сильнее взвихривать дымовые газы

в топке, тем больше тепла они отдадут стенкам. Но любые завихрения – это газодинамические потери, тормозящие движение газов. К тому же завихрения в топливнике неминуемо приводят к дымлению при раскрытии дверки топливника. Поэтому мастера при изготовлении печей стремятся сделать топливник повыше, чтобы «клубы дыма вились выше дверки» и не выходили наружу при открывании дверки (хотя в высоком топливнике дрова горят хуже из-за холодного свода). При этом высота топливника по существу определяется не высотой перекрыши (перекрытия потолка топки), а высотой расположения хайла (отверстия, соединяющего топливник с дымоходами). Как правило, низ хайла должен быть выше верха дверки топливника хотя бы на четверть кирпича (на 5–7 см). Однако, правильной организацией потоков можно добиться отсутствия дымления и при низком расположении хайла. Дело в том, что наиболее нежелательными являются нисходящие дымовые потоки в зоне дверки (поз. 18 на рис. 106в), а в зоне остальных стенок печи нисходящие дымовые потоки играют полезную роль нагревателей стенок. Поэтому все схемы печей с расположением хайла и дверки в противоположных сторонах топки (см. рис. 101, 106, 108, 116) хоть и очень распространены в быту, но не оптимальны с рассматриваемой точки зрения, то есть склонны к дымлению через дверку топки. Более надёжны схемы печей с отбором дыма непосредственно над дверкой (рис. 103г, 117). Действительно, в этом случае восходящий поток над огнём не может развернуться вниз в проём дверки, поскольку вынужден подниматься вверх в верхний дымоход или дымовую трубу. Хайло при этом выполняет по существу роль пылесоса, увлекающего дым из зоны дверки топливника вверх.

Вторым фактором дымления через дверку топливника являются движения расстилающихся по низу топливника дымовых газов. Эти дымовые газы образуются из нисходящих циркуляционных потоков, несколько охлаждённых после контакта со стенками топливника. Особенно ощутимы расстилающиеся дымовые газы при больших площадях колосниковых решёток, переводящих печь из режима рис. 112а в режим рис. 112б. Поэтому обычно колосниковую решётку выбирают ограниченного размера (например, в четверть дна топливника с возможным углублением для скатывания дров и углей) и располагают ближе к дверке так, чтобы восходящий поток свежего воздуха через оголённую переднюю часть решётки поднимал расстилающийся дым вверх. Самый плохой случай в плане дымления создаётся тогда, когда воздух идёт преимущественно через заднюю часть решётки вверх по задней стенке печи в дымоход, также установленный сзади. При этом в зоне дверки топливника образуется застойная зона, «прилипающая» к открывающейся дверке и свободно выходящая из топки. В случае подовых печей входящий по-

ток свежего воздуха вдоль по поду 7 (рис. 117) отдувает от дверки растущий дым.

Наличие циркуляции в топливнике неизбежно приводит к смешению подаваемого в печь свежего воздуха с дымовыми газами. Это значит, что дрова горят в «разбавленном» воздухе с меньшим количеством свободного (активного) кислорода: температура пламени снижается, высота пламени увеличивается, дымность продуктов сгорания повышается. Поэтому циркуляция особо нежелательна на этапе растопки печи, когда тяга слаба. Достичь быстрого разгорания дров при минимальном дымлении можно только «раздуванием пламени» – локальной подачей свежего воздуха строго в точки воспламенений дров. В этом заключается основная особенность дров, отличающая их от газообразных и жидких топлив.

Нельзя рассматривать горящие дрова как единое однородное целое. Дрова состоят из отдельных поленьев, и каждое полено даже в коллективе горит по-своему (хоть и в зависимости от других и влияя на другие), в зависимости от своих размеров, формы и сухости, в зависимости от температуры окружающих поленьев и газов (воздуха), от состава дымовых газов, скорости их движения, от потоков лучистого тепла и т. п. Иными словами, полено в костре горит по-иному, нежели полено вне костра (из-за взаимного лучистого обогрева), а полено в печи горит по-иному, нежели в костре, поскольку воздух к каждому горящему полену в печи подаётся не просто дозированно (ограниченно), но и специально организовано. Наиболее разумно сжигать дрова, подавая свежий воздух к каждому полену индивидуально по отдельным трубочкам (шлангам). Попробуйте дунуть через трубочку (ртом или феном) в основании пламени у дров, и высота пламени тотчас уменьшится. Останется лишь быстро управлять трубочками как брандспойтами на пожаре. Простейшие устройства для ориентировки струи свежего воздуха можно изготовить самостоятельно (см. например, рис. 106г), но постоянно использовать такие устройства (даже хотя бы на этапе растопки) в бане никто не будет из-за крайней хлопотливости процедуры. Проще просто заложить дрова в топливник и поджечь, не утруждая себя затем дополнительными действиями ради экономии двух-трёх поленьев или ради устранения дымлений. Но в будущем когда-нибудь, может быть, перед печью порой кое-где будут «сажать» специального робота для непрерывного управления процессом горения дров в печи.

При всей своей кажущейся экстравагантности вопрос «роботизации» печей вовсе не столь уж надуман, поскольку дрова ещё долго никуда не денутся, а микроэлектроника движется семимильными шагами. В первую очередь имеется в виду простейшая регулировка расхода воздуха для горения дров, но не столько в плане КПД (который не столь уж ва-

жен), сколько для быстрого розжига, пониженного дымления из трубы, равномерности теплоотдачи во времени, для регулировки мощности и т. п. Дело в том, что во многих городах до сих пор используется печное отопление, выбросы из дымовых труб серьёзно загрязняют атмосферный воздух и ухудшают экологическую обстановку региона проживания. Например, в городе Аделаида (Австралия), расположенном на холмах, дым при растопке печей загазовывает вышележащие дома и является предметом частых претензий соседей. Поэтому администрацией принята практика специального обучения населения приёмам бездымного розжига печей малыми закладками (раздел 5.7.11).

Кирпичные печи с теплоёмким топливником относятся к трудно управляемым устройствам в том смысле, что изменяя расход воздуха через печь, невозможно быстро изменить скорость пиролиза дров. Точно так же как массивные конфорки бытовой кухонной электроплиты продолжают «варить пищу» после отключения электроэнергии, массивный раскалённый топливник после прекращения подачи воздуха (после закрытия поддувала) продолжает нагревать дрова, заставляя их выделять летучие (горючие газы пиролиза). Летучие заполняют топливник, дымообороты, дымовую трубу, частично абсорбируясь на активной саже в дымоходах (делая их более пожароопасными), но преимущественно удаляются через оголовки трубы в виде сизого или чёрного дымового следа. Поэтому во всех печах, а в кирпичных особенно, опасны резкие закрытия поддувала, а также последующие резкие открытия поддувала и дверок, способные создать взрывоопасные смеси в топливнике и дымоходах с последующими возможными хлопками и выбросами пламени или дыма в помещение.

Продолжим анализ аэродинамических явлений при горении дров в топливнике металлической малодымящей и быстро разгорающейся печи с горизонтально-наклонным дымооборотом (рис. 117). В отличие от колосниковых печей, воздух в этой подовой печи подаётся не куда попало (то есть не через весь массив дров в целом), а через струйное отверстие 7 строго (или, по крайней мере, преимущественно) в точку горения 6 по поду 4. Циркуляционные задымленные потоки 13 при этом не могут попасть в зону дверки топливника 10, поскольку устремляются вверх либо в зону над горизонтальным дымооборотом 14 (нагревая верхние плоскости печи и дымоход для быстрого создания тяги) или под горизонтальным дымооборотом 14 для нагрева стального листа дымооборота. Дрова очень быстро разгораются (также как наветренная сторона костра), воздуха начинает не хватать, пламя удлиняется, устремляясь в дымоход 12, тем самым быстро усиливая прогрев дымохода и повышая тягу. Дымооборот 14 и под 4 раскаляются, начинают испускать лучистое тепло 15,

теплопотери горящих дров сокращаются до минимума. При этом пространство под листом 14 превращается, по существу, в газогенератор, выпускающий из-под среза листа горячий поток летучих, догорающих уже над дымооборотом. Поток летучих может стать настолько мощным, что способен создать высокое местное газодинамическое сопротивление в месте разворота у среза листа дымооборота. Это вызывает повышение давления в топливнике и прекращение поступления воздуха 7 в топливник. Топливник заполняется дымовыми газами, горение летучих приостанавливается. Температура дымовых газов понижается, давление в топливнике падает, и воздух вновь приобретает возможность поступать в топливник. При этом перед дровами происходит смешение летучих с потоками начинающего входить в топку воздуха, образуется взрывоопасная смесь, которая при своём распространении до горячих углей воспламеняется с хлопком и выбросом дыма через отверстие 7. Топливник вновь заполняется дымовыми газами, всякие процессы горения вновь прекращаются, давление падает, и воздух вновь начинает проникать в топку, создавая взрывоопасную газовую смесь и т. д. Особенности этих нестационарных процессов сложны и порой трудно объяснимы, но нам важен сам общеизвестный факт: печь может входить в режим пульсирующего горения. Такое явление лучше известно в случае камер сгорания (в том числе ракетных и реактивных) на жидких и газообразных топливах: существуют даже специальные водогрейные газовые котлы с пульсирующим горением, например, ПВ-100 и ПВ-400 производства ФГУП «Крэмз».

Пульсирующее ревущее горение печи с выбросами дыма через все щели, конечно, неприемлемо для бытового режима. Для обеспечения режима спокойного горения можно сократить длину горизонтального дымооборота 14, увеличить диаметр трубы и т. п. Однако имеются совсем другие решения, которые раскрывают первичную причину появления пульсирующего горения. Например, достаточно приоткрыть дверку топливника 10, и хотя при этом возможен разовый выброс дыма и пламени, хлопки тотчас исчезнут, рвущееся пламя «залезавшее» ранее далеко в дымовую трубу, укорачивается до обычных для костра «языков». Хлопки исчезают также при установке преграды на пути струи входящего воздуха 7 (например, в виде уголка 8). Так что причина хлопков была вовсе не в малом диаметре трубы, а в режиме горения. Если струя воздуха 7 перестаёт «раздувать» точку горения, отклоняется (взвихриваясь и рассеиваясь в среде дымовых газов), то в точку горения 6 начинает поступать разбавленный воздух, но зато на дожигание летучих приходится больше кислорода. Всё это говорит о том, что первичной причиной хлопков является малый коэффициент избытка воздуха (меньше единицы) в зоне горения и нехватка кислорода на дожигание летучих. Именно большое

количество несгоревших летучих создаёт возможность образования взрывоопасных смесей со свежим воздухом. Такая ситуация возникает, когда весь свежий воздух идёт на первичное горение, а на вторичное горение (догорание летучих) воздух не подаётся. Дополнительной причиной хлопков может оказаться и искривлённость траектории дымовых газов в дымооборотах, создающая повышенное местное газодинамическое сопротивление. Известно, что и в кирпичных печах с колосниками (особенно расположенными в глубине топки) случаются хлопки при сильном дымлении (мощном пиролизе) дров и резком открытии дверки топливника. При горении древесных углей никаких хлопков возникать не может.

Во многих металлических печах нижние воздухоприёмные отверстия 7 используются лишь при растопке или в режимах длительного горения (тления) дров. Для режима пламенного горения назначены крупные отверстия с задвижками 9 (в том числе монтируемые в распахивающихся дверках 10). Несмотря на то, что эти крупные отверстия 9 расположены высоко, холодный входящий воздух проваливается (падает) вниз и идёт по циркуляционной траектории преимущественно под дрова на горящие угли. Поэтому случается так, что на дожигание газообразных продуктов пиролиза (летучих), выделяющихся из дров, подогреваемых нижележащими углями, воздуха не хватает, и начинаются хлопки с выбросами пламени. Для устранения хлопков и в этом случае к отверстию 9 приделывается (приваривается) рассекатель входящего воздушного потока, чаще всего в виде уголка, который, точно так же как и уголок 8, взвихряет поток воздуха и разделяет его на первичное горение дров (вниз) и на вторичное дожигание летучих (вверх). При наличии рассекателя хлопки прекращаются, но и печь горит «более лениво», не так чутко реагируя на открытие задвижек. Вынужденная «размазанная» подача воздуха в топку является основной причиной медленного горения дров в громадном большинстве печей, начиная от традиционных кирпичных колосниковых печей и кончая металлическим «булерьяном». Таким образом, на примере этой простейшей металлической печи мы убедились, насколько сильно аэродинамическая обстановка влияет на характер горения печи, особенно при малых коэффициентах избытка воздуха как окислителя. Не менее сложны и газовые течения в дымоходах. Как правило, восходящие потоки горячих дымовых газов сопровождаются нисходящими (в том числе и циркуляционными) газовыми течениями. Мы уже упоминали о возможности «проваливания» холодного атмосферного воздуха в тёплые дымовые газы камина (рис. 100а), особенно на этапе растопки. Поэтому течения в трубах стараются упорядочить так, чтобы нисходящие потоки могли образовываться только у строго определённого

ных стенок дымовых каналов (например, у стенки с дымовым зубом в случае английских каминов). Абсолютно такие же потоки могут возникнуть в многооборотных печах при растопке при открытых летних дымоходах (рис. 101а). В металлических безоборотных печах и в кирпичных печах с горизонтальными дымооборотами (рис. 108) свежий воздух через трубу в топливник проникает легче всего, что и обуславливает догорание углей в печах при закрытых воздухозаборных отверстиях.

Нисходящие потоки холодного воздуха не только механически препятствуют подъёму тёплых дымовых газов в трубах, но и охлаждают их, уменьшая величину тяги. В связи с этим напомним, что кирпичные печи из-за слабой тяги особо плохо разжигаются по крайней мере при трёх объективных атмосферных условиях:

- сильный ветер задувает в трубу;
- атмосферный воздух имеет настолько высокую влажность (90–100%), что дополнительное выделение влаги при горении дров приводит к настолько высокой влажности дымовых газов, что при растопке в холодной трубе происходит конденсация водяных паров с образованием тумана в охлаждающихся дымовых газах, и с увеличением плотности дымовых газов (выше плотности атмосферного воздуха) тяга исчезает;
- атмосферный воздух имеет высокую температуру (например, днём в жару летом), а дымовая труба сильно охлаждена (например, ночью) так, что плотность воздуха в трубе выше плотности воздуха в атмосфере, и величина тяги имеет отрицательное значение.

5.7.5. Полости в печах. Гидравлическая модель

Как мы уже убедились, аэродинамика топок отличается от аэродинамики дымовых каналов, причём не только из-за того, что в топке «горит огонь», но и из-за того, что топки являются не каналами (трубами), а полостями (сосудами, объёмными элементами печи). В этом разделе мы начнем рассматривать особенности подобных полостей в печах (то есть существенных расширений дымовых каналов), движения газа в которых порой заранее не может предсказать даже опытный печник. Одно дело, когда дым движется единым потоком по трубе постоянного малого сечения, когда картина одномерная и знакомая всем «по водопроводному шлангу». Но стоит только этот шланг бросить концом в заполненную водой бочку, то сразу станет ясным, что картина потоков в бочке может быть намного более сложной, чем в шланге.

Сейчас трудно представить себе, что еще во времена Петра Великого никто в мире не знал, что такое воздух и что такое дым. Только при Екатерине Великой люди «догадались», почему дым поднимается вверх –

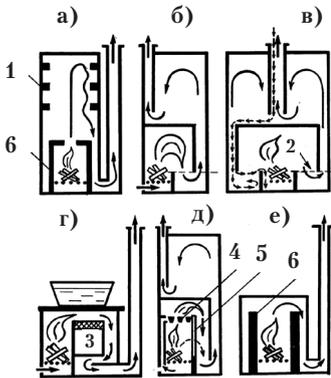


Рис. 118. Схемы печей: а – колпаковая системы Грум-Гржимайло, б – печь Подгородникова «двухрусный колпак» (имеющая один переточный канал 26x13 см), в – схема «б», но «двухсторонняя, имеющая охватывающий кольцевой переточный канал, обеспечивающий «свободный» выход дыма из колпака (мелкими пунктирными стрелками показаны потоки холодного воздуха, тонущие в тепловой труб), г – кухонная плита с духовкой, д – печь Кузнецова «усовершенствованный двухрусный колпак», е – печь с противотоком (contraflow). 1 – рёбра кирпичные для увеличения теплоотдачи, 2 – высота перевала топки и высота подвёртки (перетока) на одном уровне, 3 – духовка, термоизолированная сверху

слоем глины (с песком и алебастром), 4 – «катализатор» горения (раскалённая шамотная решётка – рассекаль пламени с подачей вторичного воздуха), 5 – «сухой шов» (вертикальная щель шириной 2–3 см для вывода из топки «холодных балластных газов», показанных пунктирной стрелкой), 6 – жаровая камера (огневой канал) из огнеупорной керамики, формирующая топку внутри печи, свободно расширяющаяся при нагреве (при 1000°C на 1% линейный) и продлевающая срок службы печи. Сплошные стрелки – ход газов.

мол существует некая субстанция «флогистон» (огненная материя с отрицательным! весом), якобы содержащаяся во всех горючих веществах. В 1783 году братья Монгольфье впервые наполнили флогистоном воздушный шар (аэростат), и этот воздушный шар действительно оторвался от земли. И хотя толпы людей видели, как флогистон поднял вверх воздушный шар, тем не менее, впоследствии оказалось, что флогистона в природе не существует вообще.

Как же в этих условиях жили и творили печники? Ведь каминные в Средние века делали не хуже, чем сейчас. Оказывается, печники с древнейших времён (а порой и поныне) обходятся лишь двумя догмами: огонь горит «на воле» (то есть на свежем воздухе), и дым поднимается «к небу». Поэтому все древние огневые системы (гипокаусты, чёрные и белые русские печи, каминные) направляли дым только вверх, но пытаясь иногда задерживать его в неких колпаках (как в воздушных шарах). Так, в конце XIX века русский инженер В.Е. Грум-Гржимайло, наблюдая, как на металлических заводах Урала рабочие разогревают на улице над костром железную болванку (перед ковкой, прокаткой, закалкой), предположил, что болванку лучше помещать в колпак, чтоб собирать в колпаке тепло от костра и не терять его попусту в виде свободно восходящих дымовых газов. Впоследствии в 1913 году на основе подобных наблюдений была предложена так называемая гидравличес-

кая модель (аналогия) течения газов в печах, причем основанная именно на теории «вольного (свободного) движения газов» (В.Е. Грум-Гржимайло, Пламенные печи, Л.: УТИ КУБУЧ, 1932 г.). Указанная теория предписывала прокладывать каналы и полости в печах в тех направлениях, куда как бы «свободно» (сами-собой) текут дымовые газы. Причём траектории движения газов не обязательно должны быть направлены только вверх: ведь охладившиеся газы могут идти вниз относительно исходных горячих. Так, в знаменитых колпаковых (струйных, фонтанных) дровяных печах Грум-Гржимайло (круглых в футляре с контрофорсами, патент № 1219 от 14.03.1917 г.) горячие дымовые газы поднимались сначала вверх в высокий колпак (образуя там «мешок» горячих газов), где, постепенно остывая, «стекали» по стенкам колпака вниз (образуя там «мешок» холодных газов), а затем «свободно утекали» в дымовую трубу (рис. 118а). При этом молчаливо (и безосновательно) подразумевалось, что дымовая труба, мол, в аэродинамике колпака не участвует, а только «отсасывает» холодные газы из колпака - ведь дымовые газы поднимаются вверх по системе колпаков как бы строго сами по себе («вольно»), без участия дымовой трубы. Поэтому любой элемент печи в форме колпака якобы не имеет газодинамического сопротивления, что обеспечивает сильную тягу в печной системе. Кроме того, предполагалось, что колпак (а не его свод) якобы по своей природе обладает выдающимися теплообменными свойствами. Ведь горячие газы, мол, не охладившись, не спустятся «сами по себе» вниз, а чтобы они ещё лучше отдавали тепло, то потолок и стены колпака предлагалось делать оребренными.

Наиболее заманчивым фактом для печников становилось то, что геометрическая форма колпака якобы никак не влияет на его принципиальные свойства улавливать тепло. Горячим газам ведь все равно, в какую форму колпака они входят. При этом, чем больше колпак, тем дальше там находятся горячие газы и тем лучше они там охлаждаются. Так что при кладке печей, мол, можно «по месту» устраивать любые по форме закутки вверх, и эти закутки будут эффективно отбирать тепло из газа.

Столь же ошибочные заключения делаются и относительно топочных процессов. Так, разный характер движения горячих и холодных газов якобы подсказывает, что топливник в форме колпака неминуемо играет роль как бы сепаратора, выделяющего наиболее горячую часть дымовых газов: языки пламени ведь тотчас устремляются вверх внутрь колпака и не дают подниматься туда более холодным газам. Это обуславливает повышенную температуру колпакового потолка топливника и даёт, казалось бы, основание считать, что колпак является эффективным сжигате-

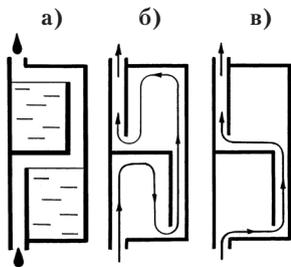


Рис. 119. Гидравлическая модель двухколонковой двухъярусной печи Подгородникова: а – гидравлический аналог (перевернутые колпаки), потоки воды (в виде перетоков, обозначенные каплями) входят и выходят, проходя два стакана; б – траектория движения наиболее горячего воздуха (дыма) через колпаки; в – траектория движения более холодного воздуха (так называемого балластного). Подгородников по непонятным до сих пор причинам стремился направить холодные балластные газы в дымовую трубу, а не оставлять в топливнике.

лем летучих. (В действительности же ясно, если на пламя костера опускать перевернутое ведро, то костер отнюдь не разгорается, а тухнет, причем с появлением большого количества дыма). Еще более неожиданным для печников является утверждение гидравлической модели о том, что в каналах любых печей одновременно текут и холодные, и горячие потоки газов, причем никак не взаимодействуя между собой (рис. 119а,б).

Гидравлическая модель печей (как слишком упрощенная) уже давно отвергнута мировой промышленной наукой (хотя она и справедлива в какой-то степени для открытых очагов, см. далее разделы 5.7.6 - 5.7.11). Тем не менее, идея колпаковых печей на основе теории «свободного движения газов» до сих пор жива и продолжает по инерции условно считаться отдельной ветвью бытового печестроения (И.И.Ковалевский, Печи отопительные и хозяйственно-бытовые, М.-Л., Госстройиздат, 1941г.). Это так называемые бесканальные печи, когда-то введенные в довоенные редакции ГОСТ 2127-43 и упоминающиеся поныне. Живучесть гидравлической модели «свободных движений газов» объясняется тем, что она бывает порой очень наглядна для бытовых печников в чисто житейских ситуациях. Действительно, любому обывателю тотчас становится ясным заявляемый принцип работы колпака на примере опрокинутого стакана, в который запускают дым от сигареты - дым и в самом деле поднимается вверх и опускается только охладившись. Но при значительных скоростях подачи дыма, например, как из выхлопа автомобиля (как раз и характерных для печей), такая модель перестает быть очевидной.

При реальном проектировании печей гидравлическая модель никогда не использовалась ни качественно, ни количественно (и никогда не могла использоваться, в том числе ввиду полного отсутствия каких бы то ни было расчетных методик и численных критериев). Действительно, прогресс колпаковых (а точнее полостных) печей никак не был связан с

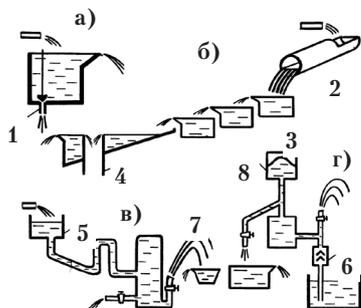


Рис. 120. Водотранспортные системы: а – перенос (перевоз) ёмкостями (вёдрами) с выливом переливом или через выпускное отверстие (слив); б – водоводы (безнапорные сети), в – водопроводы самотечные (напорные сети с гравитационным напором), г – водопроводы насосные (напорные сети с механическим напором). 1 – сливное отверстие с затычкой, 2 – водовод в виде жёлоба или неполностью заполненной трубы, 3 – переливные ёмкости, 4 – перелив (водопад), 5 – напорный бак, 6 – насос, 7 – струя (фонтан), 8 – напорный бак мембранный.

безудержным увеличением размеров колпаков. Наоборот, размеры колпаков все более сокращались - сейчас порой трудно отличить так называемый колпак от канала (И.С. Подгородников, Конструкции отопительных печей и связанный с ними тепловой режим помещения, диссертация канд. техн. наук, 1950 г.). Так, в целях снижения перегрева высокого колпакового верху печи (не столь уж полезного потребителю) и уменьшения выделений сажи в колпаке были предложены двухколпаковые (или многоколпаковые) печи на двух (или нескольких) ярусах (рис. 118б). Фактически перекрытие топки стало нижним «колпаком», перегрев свода которого полезен для обогрева помещения из-за его небольшой высоты над уровнем пола помещения (И.С. Подгородник, Печи домашнего обихода, М.: ВСНХ, 1929 г.). В целом, схема нижнего яруса стала близка к конструкциям обычных кухонных плит с духовкой (П.И.Воропай, Справочник печника, М.: Стройиздат, 1985 г.), разве что уровень перевала топки порой опускается до уровня (но не ниже) подвёртки колпака 2. С 1990-х годов И.В.Кузнецов видоизменяет печи типа «двухъярусный колпак Подгородникова» в части введения «сухого шва» (вертикального щелевого разреза жаровой камеры топливника), «катализатора горения» (шамотной рассекающей решётки над пламенем с подводом вторичного воздуха) и т.п. (рис. 118д), опираясь исключительно на умозрительные представления (www.stove.ru).

Все схемы печей на рисунке 118 достаточно сложны для анализа (в плане оценки эффективности) и до сих пор являются предметом профессиональных обсуждений. Все печи конструктивно скорее отличны друг от друга, чем похожи, но найти характерные отличия и сходства трудно. Более того, все схемы на рисунке 118 можно трактовать формально как угодно - и как колпаковые, и как противоточные, и как каналные - кто как с какой стороны взглянет. Гидравлическая теория не дает никаких расчетно-конструкторских критериев «колпаковости».

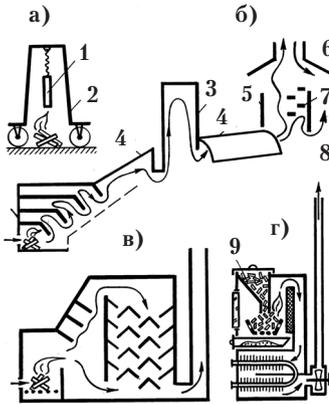


Рис. 121. Газотранспортные системы (применительно к лёгким горячим дымовым газам): а – колпак (перевернутый стакан), например, с подвесом разогреваемой болванки в транспортируемом колпаке, б – газопроводы (безнапорные сети), реализующие «свободное движение горячих газов» (свободную естественную конвекцию) по потолкам (арочным сводам), по колпакам и по восходящим затопленным струям, в – газопроводы герметичные с разрежением, с захлебнувшимся входным воздушным отверстием, с гравитационной вытяжкой дымовой трубой, г – газопроводы с принудительной конвекцией (с механической вытяжкой вентилятором-дымососом). 1 – подвешенное нагреваемое на костре изделие, 2 – колпак транспортируемый (на колёсах), 3 – колпаки проточные, 4 – наклонные потолки и арочные своды (опрокинутые желоба), 5 – вертикальные трубы непереполненные, 6 – зонты, 7 – насадки в трубах (секции), способные препятствовать свободному подъёму горячих газов, 8 – «перелив» газовых потоков при переполнении трубы, 9 – бункер с пеллетами.

1 – подвешенное нагреваемое на костре изделие, 2 – колпак транспортируемый (на колёсах), 3 – колпаки проточные, 4 – наклонные потолки и арочные своды (опрокинутые желоба), 5 – вертикальные трубы непереполненные, 6 – зонты, 7 – насадки в трубах (секции), способные препятствовать свободному подъёму горячих газов, 8 – «перелив» газовых потоков при переполнении трубы, 9 – бункер с пеллетами.

Отметим, однако, один крайне не существенный, с первого взгляда, отличительный признак, на котором мы, тем не менее, вынуждены остановиться. Печи Подгородникова и Кузнецова (и только они) обладают свойством «свободного пропуска холодных газов» через всю печь в обоих направлениях (но только при условии достаточно больших проходных сечений переточных каналов!). Действительно, если при остывании печи (в условиях незначительности скоростей подъёма тёплых газов) тяжёлый атмосферный воздух начнёт «проваливаться» в лёгкий тёплый воздух остывающей трубы (как в вытяжных зонтах и в трубах каминов), то он, пройдя по поду (дну) верхнего колпака, затем «провалится» в нижний колпак (рис. 118в). Он может даже проникнуть в топку печи и далее в помещение (при открытой дверке топки) или, нагревшись, уйти вновь в трубу, заиклившись, как в системе вентиляции погребов.

Как мы увидим ниже, подобное явление характерно именно для случая «свободного движения газов». Следствием «свободного пропуска холодных газов» является эффект «автоматической газовой вьюшки»: холодный воздух, случайно проникая через неплотности дверки в топку, поднимается вверх, не «залезая» в горячие колпаки даже при открытой трубной заслонке (которая и называется вьюшкой). Поэтому полагают, что печи, обладающие свойством «вьюшки», плохо выхолаживаются даже в условиях открытой вьюшки и долго обогревают помещения (И.С. Подгородников, Как сложить печь, М.: Новая волна, 1998 г.). Все остальные печные системы на рис. 118 указанными свойствами не обла-

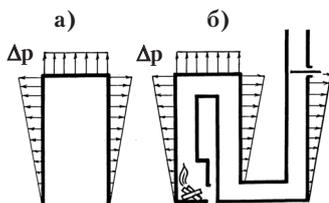


Рис. 122. Избыточное давление горячих газов (относительно атмосферы на том же высотном уровне) в колпаке (а) и в канальной системе печи (б). Предполагается, что все стенки колпака и гипотетической печи (с закрытой вьюшкой – верхней задвижкой на дымовой трубе) имеют одну и ту же температуру, превышающую температуру атмосферного воздуха. Направления стрелок указывают, что газы в возможных отверстиях должны выходить наружу.

дают. Воздух, проникающий сверху через трубу, не может проникнуть к топке из-за «гидрозатвора» (перевала), а воздух, проникающий снизу через топку, может подняться внутри горячих колпаков.

Попробуем разобраться, случайны ли столь «тонкие» особенности печей или нет, важны ли они. Ученики Грум-Гржимайло традиционно поясняют работу печных колпаков примером свободного перетекания воды из сосуда в сосуд (рис. 119а). Легко видеть, что если переточные вертикальные каналы работают в режиме свободного перелива (то есть не заполнены полностью водой), то система свободно пропускает воздух в любом направлении (и снизу вверх, и сверху вниз). Теперь перевернём рисунок 119а «вверх ногами» и запустим в систему горячий газ (рис. 119б). Из системы «стаканов» получаем систему колпаков, в которой горячий газ, как более лёгкий, всплывая, «свободно перетекает» вверх из колпака в колпак. Холодный же газ «свободно ходит» (при дуновении снизу вверх или сверху вниз) внутри каналов, не заходя в колпаки (рис. 119в). В этом заключается суть гидравлической модели свободных течений. Так, например, восходящий столб дыма над костром окружен холодным воздухом, который может двигаться совершенно самостоятельно, независимо от дыма.

Таким образом, печи Подгородникова и Кузнецова сконструированы (но только при условии очень просторных переточных каналов!) в полном соответствии с гидравлической моделью, чего нельзя сказать о печи самого Грум-Гржимайло (рис. 118а).

5.7.6. Полости в печах. Супергидравлическая модель

Ещё при жизни Грум-Гржимайло было доказано, что в реальных печах «свободного движения газов» практически никогда не бывает. Это объясняется тем, что печи состоят не только из полостей (колпаков), но и из дымовых каналов весьма ограниченного проходного сечения. Такие каналы, как правило, «захлёбываются», и движения газов в печах начинают целиком определяться влиянием дымовой трубы.

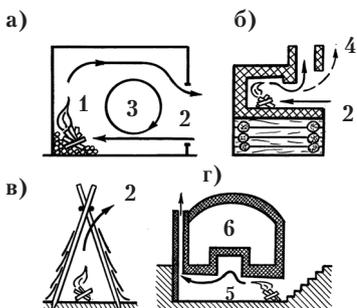


Рис. 123. Примеры свободно конвективных систем: а – чёрная (курная) баня, б – русская печь, в – костёр в чуме, г – подвальная древнеримских термов (гипокауст). 1 – костёр, 2 – вентиляционный поток, 3 – циркуляционный поток, 4 – дымление при переполнении дымовой трубы, 5 – дымовые газы, заполняющие колпак (полоую платформу для потения), 6 – помещение хаммама.

Чтобы популярно пояснить суть реальных явлений и устранить многие недосказанности, «расширим» простейшую гидравлическую модель печей до некой «супергидравлической модели». Как и ранее, для наглядности будем проводить известные аналогии между течениями воды и течениями газов. А именно, будем использовать тот очевидный факт, что легкий горячий газ всплывает в тяжелом холодном газе в принципе точно также (аналогично), как тяжелая вода падает в легком воздухе. Подобная аналогия, конечно же, крайне условна - ясно, например, что вода падает с утоньшением струи (и не увлекая окружающий воздух), а горячий дым от костра поднимается с утолщением струи (увлекая за собой громадные количества окружающего воздуха). Тем не менее, такая аналогия позволяет прогнозировать принципы движения легких (именно легких!) дымовых газов методом «переворачивания вверх ногами» знакомых всем с детства водных течений.

Вспомним, что существуют разные виды передвижения (способы перемещения-транспортирования) воды (жидкостей): ёмкостный, водоводный, водопроводный с естественным (собственным) напором и водопроводный с механическим (принудительным) напором.

Ёмкостные системы являются беспроточными и реализуются с помощью вёдер, бочек, стаканов, цистерн (рис. 120а). Такие водные системы имеют газовый аналог – колпак (рис. 121а), который представляет собой перевернутый стакан. Идеальный колпак – это непроточный сосуд, имеющий только одно отверстие, причём внизу, постоянно открытое в атмосферу так, чтобы давление газа на нижнем срезе никогда бы не отличалось от атмосферного. Если идеальный колпак заполнен горячими (относительно окружающей среды) газами, то во всём колпаке возникает избыточное давление: в любом месте можно просверлить отверстие и убедиться, что газ выходит наружу точно также, как из отверстия в дне стакана всегда вытекает вода. Максимальное значение избыточного давления достигается в верхней части колпака, и в этом плане колпак ничем

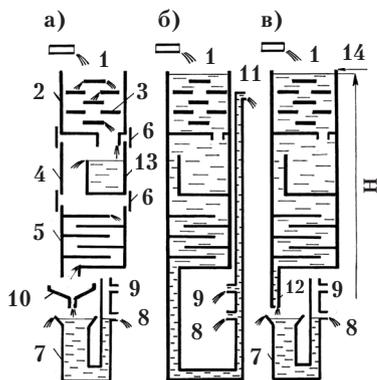


Рис. 124. Схемы водных систем: а – водоводная схема свободно стекающих вниз водных потоков, б – герметичная водопроводная система сообщающихся сосудов (имитирующая водоводный стакан с переливом, но не пропускающая воздух, а, значит, являющаяся водопроводной), в – герметичная водопроводная система с нижним заужением, открыто сообщающаяся с водопроводной системой типа сообщающихся сосудов. 1 – подача воды любого типа, 2 – секция с горизонтальными рассечками, 3 – рассекатели струй (площадки), 4 – секция типа стакана со свободным переливом в переливной канал (патрубок), 5 – секция с горизонтальными площадками – перетоками

(оборотами), 6 – манжеты, герметизирующие стыки между секциями (при переходе от водоводной к водопроводной системе), 7 – сообщающиеся сосуды (водопроводный тип системы) – стакан с «плавающим островом», 8 – переливное отверстие, 9 – отверстие, служащее для подтверждения того, что вода не может подняться выше уровня воды в основном колене, 10 – воронка, 11 – выходное отверстие водопроводной системы верхнее, 12 – выходное отверстие водопроводной системы нижнее, 13 – стакан (ёмкость накопительная), 14 – срез (уровень) воды.

не отличается от тёплого помещения, открытого снизу (рис. 42б, 122). Колпак принципиально невозможно переполнить горячими газами - излишки газа тотчас выйдут «из-под колпака» точно так же как и излишек воды всегда и немедленно перельётся через края стакана.

Водоводные системы являются простейшими проточными сетями (рис.120б) и хорошо известны в природе в форме последовательности рек (ручьев), прудов (водохранилищ) и водопадов (переливов). Реки могут быть даже «взяты» в трубу: лишь бы вода стекала свободно, не «переполющая» (не заполняя, не перекрывая всё сечение) трубы. Реки могут течь тысячами километров при перепаде уровня воды лишь в десяток метров. При этом даже максимальные перепады давления в атмосфере (до 400 мм водяного столба) не имеют особого значения, так же как и ветер может свободно дуть над водой в ту или иную сторону и лишь при больших скоростях способен повернуть реку вспять (как Неву в Санкт-Петербурге). Свободные течения воды характерны тем, что возникновение любой впереди (запруды) не ощущается вообще или ощущается не сразу: действительно по уровню воды в Волге у Твери невозможно определить (по крайней мере быстро), открылась или закрылась задвижка плотины ГЭС где-нибудь под Волгоградом.

Переворачивая «вверх ногами» водоводную схему и заменяя воду на горячие дымовые газы, а воздух на холодный воздух, получаем

газоводную систему (рис. 121б), отвечающую гидравлической модели Грум-Гржимайло «свободного движения горячих газов». Всем известны свободноконвективные потоки горячих газов, поднимающиеся над кострами столбами дыма, расстилающиеся по потолкам, перетекающие слоем под наклонными сводами, заполняющие колпаки (купола, колокола) и перетекающие из «колпака в колпак», например, как в курных избах, русских печах, каминах, вентиляционных зонтах и т. п. (рис. 123).

Горячие газовые потоки, текущие горизонтально или наклонно под сводами (по перевёрнутым желобам), можно «взять» снизу в «поддоны» («кожухи»), а горячие газовые струи, свободно восходящие вверх (аналоги водопадов-переливов), можно окружить обечайкой. Во всех этих случаях горячие газы будут течь свободно в составе труб, лишь бы трубы и кожухи не «переполнялись», то есть лишь бы горячие газы не перекрывали всё проходное сечение трубы. Таким образом, в газоводных системах свободные горячие газы (и в пространстве, и в трубах) должны обязательно контактировать со столь же свободными холодными газами, которые тоже могут течь произвольно («как хотят»). В идеальной газовой (так называемой гидравлической) модели горячие и холодные потоки газов никак не взаимодействуют ни между собой, ни со стенками трубы, но в реальности горячие и холодные газы (как и любые иные газы) не являются абсолютно свободными (независимыми), поскольку постоянно обмениваются массами (перемешиваются диффузно и турбулентно), импульсом (тормозятся или ускоряются) и энергией (нагреваются или охлаждаются). Трубные участки газоводных сетей обязательно должны иметь ограниченную длину (или же должны быть негерметичными), чтобы холодный газ в трубе был бы частью атмосферы. При этом давления в горячих газах строго равны давлениям в холодных газах (в том числе и в атмосфере) на том же высотном уровне (в отличие от газопроводных систем). Тяга или напор отсутствуют.

С увеличением расхода воды (или газа) элементы «свободных» водоводных (и газоводных) систем могут принципиально менять режим работы: переливные трубы (сливные каналы плотин) переполняются (и уже не в состоянии пропускать всевозрастающие количества проточной воды), водохранилища и реки начинают «переливаться через края» и разливаются по поверхностям («выходить из берегов») т. д. Также всем известно, что вытяжной зонтик с естественной вытяжкой может «не справиться» с потоком восходящих горячих газов и, «захлёбываясь», начинает дымить с переливом дыма через края (например, по аналогии с 8 на рис. 121). Применительно к вертикально ориентированным системам (рис. 124), это означает, что вода при возрастающих расходах уже не может «свободно» стекать в сливные отверстия 12 (переливные каналы 4)

ручейками (каплями, плёнками, струйками) со ступеньки на ступеньку вниз, задерживаясь только в «лужах» (стаканах 13 и сообщающихся сосудах-чайниках 7). Рано и поздно один из переливных патрубков (например, сливное отверстие 12) «захлёбывается» (так же как засорённый слив в кухонной раковине), и вся вышерасположенная система секций системы (поз. 2, 4, 5, 10, 7) заполняется водой (до высоты H с достижением перелива воды «из раковины через края» с верхнего среза водной системы 14). При этом объёмы воды в патрубке 12 будут двигаться уже не под «собственным весом», а под весом (напором) всего вышерасположенного водяного столба высотой H . Такие водные системы называются водопроводными с естественным напором. При разгерметизации манжет 6 водная система вновь становится водоводной (переливной безнапорной), что случается при аварийных прорывах труб городского водопровода, когда жидкость, изливаясь, начинает течь «свободно» сама по себе в грунтовых кавернах или по поверхности земли. Водные системы могут чередовать водопроводные и водоводные участки. Более того, водопроводная система может «протекать» (в случае дырявых стенок) и обладать свойствами и водопровода (внутри), и водовода (снаружи). О таких схемах и пойдет речь ниже.

Водопроводные системы с естественным (собственным) напором (самонапорные) принципиально отличаются тем, что заполнены водой полностью, и воздух в них отсутствует, а избыточное давление воды (по сравнению с атмосферным давлением) присутствует не только в «стаканах» (водонакопительных сосудах), но и в переточных каналах (трубах) как горизонтальных, так и вертикальных. Вода по водопроводному самонапорному участку сети (рис.124в), конечно же, течёт как-бы «сама собой» под действием только собственных гравитационных сил, но не совсем свободно, как бы стеснённо с «зажимами» потока в переточных отверстиях. Причем вода в этих переточных отверстиях продавливается не только за счет собственного веса, но и за счет веса вышерасположенных (напора) или веса нижерасположенных (тяги) слоев воды (тянущих вниз). Перекрытие потока тотчас ощущается во всех участках водопроводной сети. Заполненные водой участки сети могут рассматриваться и как единые «стаканы» (может быть, со сложной схемой внутренних перегородок и со сливами в дне), внутри которых как-то (совсем не похоже на открытые водоводы) текут потоки жидкости. Герметичные системы типа сообщающихся сосудов (рис. 124б) заполняются и становятся водопроводными и без «захлебываний», поскольку сами по себе представляют единый «стакан».

Водопроводы с разрежением (тягой) за захлебнувшимся каналом (отверстием) менее распространены, чем обычные напорные

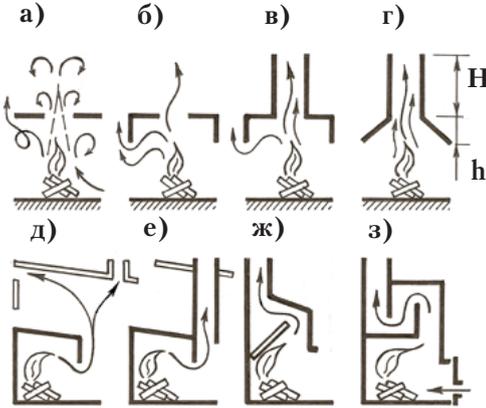


Рис.125. Схемы течений, поясняющие переход от газопроводного режима к газопроводному.

водопроводы, но применяются и в дачном быту, например, в схемах водяного отопления (высотой до 10 метров, отвечающей условию «неразрывности» разреженного столба воды при внешнем давлении атмосферного воздуха 1 атм) и в схемах водоснабжения с

открытой нижней сливной трубой и с запорно-регулирующим вентиляем над водонапорным баком. Именно такие схемы имитируют схемы канальных печей (см. далее). Отметим попутно, что водопроводы с разрежением часто имеют на нижнем свободном конце гидрозатвор (сифон) для предотвращения самопроизвольного вылива воды из труб после перекрытия потока. Дымозатворы (гуськи) на оголовках дымовых труб печей (для предотвращения захлаживания печей после протопки) используется редко из-за добавочных сопротивлений и возможных промерзаний зимой.

Переворачивая вверх ногами водопроводную схему (рис. 120в), получаем газовый аналог - горячую (именно горячую!) газопроводную схему (рис. 121в) с естественным напором до заужений (каминный тип системы, когда входное отверстие по проходному сечению больше выходного трубного) или с естественной тягой (разрежением) после заужений (печной тип системы, когда входное отверстие меньше выходного). Такая газопроводная система перед захлебнувшимся заужением (напорная) всегда заполнена только горячими газами (холодные же газы могут располагаться только в атмосфере).

При этом необходимо помнить о самой досадной натянутости любых гидравлических аналогий - если вода никогда не становится воздухом, то именно холодный воздух становится в топливнике горячим, а потом вновь становится холодным по мере продвижения по печи. Например, горячий газ в борове (горизонтальном участке дымовой трубы),двигающийся в «водоводном» режиме медленно из-за малости гравитационного перепада давлений, к тому же может и совсем остыть, и рассматриваемый «объект движения» (горячий газ) вообще как-бы исчезнет. Поэтому для правильных заключений необходимо с

некоторым воображением представлять неразрывность газовых потоков, выделяя из состава холодных газов будущую (или ранее) горячую составляющую (например, входящую в захлебнувшееся «переполненное» отверстие поддувала печи) и считая ее все время горячей.

В качестве примера рассмотрим струю восходящих горячих газов над костром. Такая струя образуется из входящих в костер снизу потоков холодного воздуха, которые собственно и нагреваются затем в зоне горения (рис.125). Горячая струя, ускоряясь при свободном подъеме, постепенно становится все более узкой (как и струя свободно падающей воды), а потому, казалось бы, способна в принципе зайти («попасть») в сколь угодно малое отверстие (свободно, не касаясь его краев), но на достаточно большой высоте. Однако, любой газовый поток увлекает за собой в движение (эжектирует, подсасывает, захватывает) за счет вязкости и турбулентности окружающий неподвижный газ. Вследствие этого, и сужающаяся струя горячих газов над костром (например, в виде «языка огня») формирует вокруг себя постепенно расширяющуюся и задымляющуюся оболочку из увлекаемого струей воздуха. Все это в виде единого и неделимого клубящегося «столба дыма» (как на рис.49 и 52) порой не может пройти свободно через отверстие и воспринимает отверстие как преграду. Так что реальные восходящие потоки дымовых газов зачастую не бывают полностью свободными (в смысле свободно ускоряющимися) не только из-за торможений окружающим воздухом (или стенками), но и из-за значительно более существенных порой всевозможных «захлебываний» (преимущественно оболочек). «Захлебывание» отверстия (рис. 125а) приводит к возникновению на преграде перепадов давления, за счет которых незакрепленная преграда может даже «всплывать» в потоке вверх («витать»), а над отверстием возникает зона разрежения, в которую подсасывается с боков воздух в струю восходящих горячих газов.

Таким образом, если отверстие велико, то столб восходящего газа (по аналогии с водопадом) свободно проходит через отверстие, не создавая ощутимых перепадов давления, поскольку гравитационные перепады давления «компенсируются» приростами скорости потока по формуле Бернулли. При уменьшении размера отверстия струя горячего газа (как и падающая струя воды) в какой-то момент касается краев отверстия, а потом уже и не «пролезает» полностью в отверстие (рис.125а). Не в силах пройти через отверстие во всем фиксированном расходе, горячий газ неминуемо притормаживается и начинает накапливаться перед преградой (одновременно и растекаясь по потолку). Утолщающийся слой горячих газов перед отверстием автоматически увеличивает

давление газа на входе в отверстие и повышает расход газа (точно так же, как и вода, накапливающаяся в дырявой кастрюле, повышает расход воды через дыры). Чтобы максимально повысить давление газа перед отверстием, надо предотвратить растекание горячего газа по потолку. Для этого создают запруды потокам горячего газа в виде зонта-дымосборника (рис.125б). Высоту зонта h необходимо увеличивать до тех пор, пока зонт не сможет «накопить достаточный напор горячего газа», чтоб затем «продавить» через трубу весь заданный расход горячего газа. Это является основой работы дымовой камеры камина (рис.125ж): чем меньше проходное сечение дымовой трубы, тем более высокой должна быть дымовая камера. На практике расход газа в камине зачастую предпочитают повышать не напором газов в дымовой камере, а разрежением в дымовой трубе, то есть увеличением высоты дымовой трубы H (рис.125в). Это многократно повышает расход дыма при горячей трубе, но создает проблемы дымлений при холодной трубе на начальном этапе растопки (К. Микеля, Печи и камин, М.: Стройиздат, 1987 г.). Конусная форма зонта (дымовой камеры) обеспечивает более быстрое заполнение зонта горячими газами и более быстрый прогрев зонта, что также лежит в основе идеи дымового зуба (заужения).

Так или иначе, в установившемся режиме «захлебнувшейся» в устье у зуба дымовой трубы расход газа через камин определяется диаметром дымовой трубы и суммарной высотой дымовой камеры и дымовой трубы (рис 125г). Если диаметр дымовой трубы черезчур уменьшить, то дымовые газы станут «переливаться» через края зонта. Если же диаметр дымовой трубы черезчур увеличить (реализовав «водоводный» режим, а по-существу, костер), то «незахлебнувшаяся» дымовая труба сможет «свободно» пропускать дымовые газы, но при этом будет «свободно» пропускать через себя и «свободные» потоки холодного воздуха то через портал вверх (захолаживающие подсосы), то из трубы вниз при каждом порыве ветра (задымляющие помещения провалы).

Технический прогресс в области отопительно-варочных печей также сопровождался переходом от «водоводных» беструбных курных печей (рис.125д) к «частично водопроводным» белым печам с кирпичным зонтом-кожухом (дымосборником-епанчей) над устьем и боровом в трубе (рис.125е), а затем к «чисто водопроводным» печам (с разрежением в топке) с топочной дверцей и с трубой непосредственно из топливника (рис.125з). Печи с разрежением в топке и тягой в дымовой трубе совершили 400 лет назад «печную революцию», реализовав многооборотные каналные печи (голландские) с нисходящими (порой ниже огня в топке) дымовыми потоками. С тех пор все отопительные печи (даже наиболее претенциозные так называемые «колпаковые печи

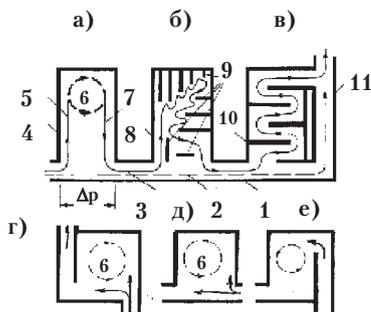


Рис. 126. Колпаковые системы: а – колпак над горизонтальным дымоходом, б – то же с оребрением, в – горизонтальные дымообороты (колпак, открытый наверху), г – колпак Подгородникова, д – замкнутый проточный сосуд с двумя отверстиями, е – колпак с подачей горячего воздуха на потолок (так называемая схема противотока). 1 – горизонтальный канал-дымоход, 2 – транзитный (сквозной) поток дыма, в том числе и относительно холодная составляющая, не способная подниматься в колпаки, 3 – потоки дыма, подверженные влиянию колпаков, 4 – колпак

вертикальный (тупиковый отросток вверх, расширение канала вверх), 5 – восходящий горячий поток дыма, 6 – циркуляционный поток (застойная зона, «мешок горячих газов»), 7 – нисходящий охлаждённый поток дыма, 8 – колпак с развитой теплообменной поверхностью, 9 – оребрение, 10 – горизонтальные дымообороты (ответвление дымохода вверх, проточное с отверстиями наверху, оребрëнное с горизонтальными рассечками – рассекателями), 11 – дымовая труба.

Кузнецова со свободным движением газов» вопреки мнению автора) являются каналными газопроводными («водопроводного» типа).

Как и водопроводы, газопроводы (напорные дымоходы-газоходы) должны быть герметичными, поскольку (в отличие от газопроводов) имеют внутри себя давление газов, отличное от атмосферного (избыток перед или разрежение за захлебнувшимся каналом). Печь находится (и продавливает через трубу дым) либо под напором горячих газов топливника (как на рис. 42б), либо под разрежением горячих газов дымовой трубы (как на рис. 42а) в зависимости от того, нижняя (поддувальная) или верхняя (трубная) задвижка печи в большей степени открыта на атмосферу. Если в топке имеется разрежение, то печная система точно и безоговорочно является «водопроводной». Сообщающиеся же сосуды, как мы уже отмечали, всегда являются водопроводами. Поэтому перевернутые сообщающиеся сосуды (колпаки или дымообороты с перевалом) всегда являются газопроводами для горячих газов даже при сколь угодно широких каналах (полостях).

Отметим, что газовые каналы в печах ни в быту, ни на производствах никогда не называют ни газопроводами, ни дымопроводами. Любые газовые каналы в печах обычно называют газоходами или дымоходами (так уж сложилось исторически). Не принято также (применяемое нами для ясности) название «газовод» и «дымовод». Вентиляторщики же называют воздуховодами именно напорные (газопроводные) сети повышенного (приточные) или пониженного давления (вытяжные). Поэтому на практике порой трудно понять, что имеют в виду печники, применяя термин «дымоход» в той или иной конструкции. Также сразу от-

метим, что в дальнейшем мы будем иногда пользоваться термином «колпак» в распространённом среди печников жаргонном смысле, имея в виду вовсе не идеальный колпак емкостной системы (аналог стакана, всегда открытого торцом на атмосферу), а замкнутый герметичный сосуд (может быть и проточный с разрезанием), пристыкованный к потолку газового канала (то есть колпак в печи - это расширение горизонтального канала вверх).

Водопроводные система с механическим (принудительным) напором отличаются тем, что напоры или разрежения воды создаются не только собственным весом самой воды, но и внешними механическими устройствами: насосами, воздуходувками, вентиляторами, компрессорами (рис. 120г). Газопроводные аналоги (рис.121г) также широко известны - принудительное дутье в доменных печах, дутье мехами в кузнечных горнах, газобаллонная (пропановая, ацетиленовая) сварочная горелка и многие другие. Распространились бытовые вентиляторные аппараты на древесном топливе, так называемые пеллеточные печи, способные непрерывно (месяцами) работать на древесных (прессованных из древесной щепы и стружки) таблетках (пеллетах).

5.7.7. Беспроточные полости

Все современные печи (даже колпаковые) являются канальными и состоят из двух обязательных элементов: каналов (вертикальных и горизонтальных) и полостей. Подобное разделение условно: полости (сосуды) являются просто более широкими каналами и могут быть отождествлены лишь как места расширений каналов (отверстий) в более широкие каналы (полости). Во всяком случае ясно, что у печи всегда есть топливник (полость) и дымовая труба (канал).

Полости бывают беспроточными (тупиковыми) и проточными (транзитными), могут располагаться вверх, вниз и вбок от каналов. Разделение полостей на проточные и беспроточные тоже весьма условно, поскольку увеличение скорости ввода газа (дыма) может превратить беспроточную полость в проточную и наоборот. Кроме того, проточные полости могут иметь беспроточные участки (узлы, секции). Ведь наличие сквозняка в комнате вовсе не означает, что в комнате не могут существовать беспроточные застойные зоны, на которые не распространяются влияния сквозняка. Поэтому понятие беспроточной полости является очень важным для печей.

Так, со времён Грум-Гржимайло не прекращаются попытки оснащения дымовых каналов 1 некими произвольными «закутками» (очень удобными при кладке «фигуристых» печей) вверх 4, в которые по идее

должны были бы «свободно» и как бы «сами собой» устремляться горячие газы 5 (рис. 126а). «Свободно покрутившись» в «закутке» 4 и охладившись там, дымовые газы «должны» возвратиться 7 в канал 1 (поскольку деваться им больше некуда). Считается, что такие «закутки» являются, якобы, эффективными теплосъёмными элементами, поскольку в таких застойных зонах горячие дымовые газы могут долго пребывать, чтобы долго отдавать своё тепло в стенки печи.

Несмотря на кажущуюся вескость, вышеприведённые соображения оказываются глубоко ошибочными. Прежде всего не факт, что в колпак «свободно» и «сами по себе» входят и выходят значительные количества горячих газов. Ведь с повышением температуры колпака подъёмная сила резко снижается, и движущиеся горячие газы из-за инерции попросту «не успевают» входить в колпак (и проходят мимо него по горизонтальному каналу). Значит, придётся «вдуть» горячий газ не горизонтально, а снизу вверх, причём со значительной скоростью, способной «пробить» колпак до потолка (за время прохождения газа в колпаке). Поэтому колпак неминуемо окажет влияние на газодинамику всей печи. С другой стороны, предполагая, что горячие газы 5, поднимаясь вверх в колпак 4, долго находятся там 6, отдавая своё тепло, мы молчаливо признаём, что на протяжении всего этого длительного периода времени новые порции горячего газа 2 не могут войти в колпак и будут вынуждены проходить мимо колпака по каналу 1 прямо в дымовую трубу (рис. 126а). Чем меньше горячих газов 5 входит в тупиковый колпак 4 и чем дольше они там «крутятся», тем меньше теплосъём в печи. Все эти факты давно известны. Пещера древнего человека спасала от порывов холодного ветра, и чем длиннее была пещера, тем «теплее» она была (например, при наличии в ней костра). И точно также, глубокая расщелина способна защитить от «потока огня», поскольку «огонь» (горячая струя) «не идёт» в щель.

Ну и наконец, оказывается, что движущийся горячий (или холодный) газ значительно лучше передаёт своё тепло (холод) обдуваемой поверхности, чем неподвижный горячий (или холодный) газ, например, в застойной зоне. Если бы это было не так, то люди в банях парились все не вениками (а помещали бы себя в некие колпаки), а дамы на балах не обмахивались бы веерами. Математически это отражается формулой для теплового потока q (Вт/м²) от воздуха к поверхности $q=(10+6V)\Delta T$, где V – скорость движения газа в м/сек, а ΔT – разность температур в градусах Цельсия. Именно поэтому в кухонных плитах делают так, чтобы дымовые газы обтекали варочную поверхность с большой скоростью. Все это в свое время подорвало не только газодинамические, но и теплофизические устои гидравлической модели.

Предложенная взамен гидравлической модели так называемая «общая теория печей» отвергла мнение о том, что чем больше время контакта горячего газа с поверхностью (чем больше время пребывания дыма в печи), тем больше теплоотдача. Наоборот, именно высокие скорости обтекания (а значит, и малые времена контакта) обеспечивают максимальные тепловые нагрузки (Н.Н. Доброхотов, Критика гидравлической теории печей, журнал «Уральский техник», № 11/12, 3–21, 1927 г.; М.А. Глинка, Основы общей теории тепловой работы печей, М.: Металлургиздат, 1959 г.; М.А. Глинка, Г.М. Глинка, Общая теория печей, М.: Металлургия, 1978 г.). Общая теория рекомендует направлять дымовые газы не туда, куда они «хотят» идти, а так, чтобы они передавали побольше тепла единице поверхности теплосъемного элемента. Общую теорию интересует не то, по каким объемам (полостям и каналам) текут дымовые газы, а то, как эти дымовые газы обтекают и нагревают теплосъемные поверхности в этих полостях и каналах (см. далее раздел 5.7.11).

Ранее в разделе 3 уже отмечалась высокая роль вязкости газа в продуваемости узких зазоров. Это означает, что разделение колпака на множество глубоких узких колпаков рассечками 9 ухудшает теплосъемные возможности всего колпака в целом. Действительно, многочисленные рассечки можно рассматривать как теплоизоляцию (как «мех кошки»), не пропускающую тепло и не впускающую в себя потоки воздуха (ни горячие, ни холодные) именно из-за малости скорости перемещения газов в промежутках между рассечками (см. раздел 3.8). Чем медленней и трудней проникают горячие газы в зазоры между рёбрами 9, тем медленней и труднее и выходят оттуда обратные (встречные) охлаждённые газы из зазоров. Для упорядочения этих газовых потоков целесообразно было бы выводить охлаждённые газы не по тому пути, по которому входят горячие газы, а именно через отверстия сверху колпака 8 в дымовую трубу (в дымовой канал – дымооборот) по типу, например, горизонтальных дымооборотов 10 (рис. 126в). Причём эта целесообразность возрастает с усилением оребрённости колпака 8. При этом сразу становится очевидным, что и непроточный, и проточный колпаки всё же (несмотря на «свободное движение газа» в нём) имеют некое газодинамическое сопротивление. Действительно, зачем газам идти в лабиринты 10, если они имеют возможность пройти по короткому прямому пути 11? Аналогично, зачем горячим газам из канала 1 «залезать» в колпак 4 и долго «крутиться» там в условиях вязкости, если он может беспрепятственно и сразу пройти мимо колпака 4 по каналу 1? Иными словами, падение давления в струе (траектории) газов в колпаке может оказаться более высоким, чем падение давления Δp в потоке газов в основном канале 1.

При этом естественно, газ из основного канала будет вынужден пойти навстречу потоку 7, замедляя вход горячих газов 5 в колпак, тем самым «запирая» его.

Оценим, с какой же скоростью горячий газ 5 способен «свободно» поступать (всплывать) в беспроточный тупик – колпак 4. Во-первых, ясно, что температура газов в колпаке 4 (а значит и температура стенок колпака 4) должна быть заметно ниже температуры горячих газов 5 в канале 1: в противном случае газ из канала 1 попросту не будет «всплывать» в колпак 4. Ведь часто забывают, что появление свободно восходящих конвективных потоков возможно лишь именно в том случае, когда газ не только горячий, но и обязательно находится в непосредственном контакте с холодным газом (например, в объёме холодного газа). Так, говорят иногда, что в нисходящем канале печи горячий газ, двигаясь вниз, «пытается» всплыть, тормозя тем самым газовый поток. Но ведь в нисходящем канале (с температурой стенок, равной температуре газа) нет холодных газов, и горячему газу попросту не в чем всплывать. Поэтому в этом случае надо рассматривать комбинацию восходящего (предыдущего) канала и нисходящего (последующего). Поскольку в последующем канале температура газа ниже, чем в предыдущем (предшествующем), то газ в нисходящем канале вовсе не «всплывает», а наоборот, «тонет», ускоряя тем самым газовый поток. Но это присуще только и именно каналам (шлангам): в широких каналах (полостях) ситуация может быть разной, но всё равно, горячий газ всплывает и тут не «сам по себе», а только в контакте с холодным газом.

Во-вторых, для того, чтобы горячие газы 5 (при наличии возможности) входили в колпак 4, надо, чтобы ранее присутствовавшие газы 7 могли бы выходить из колпака. Иными словами, газы 7 должны успеть остыть в колпаке и составить с газами 5 два колена газооборота (сообщающиеся сосуды-каналы) с разной температурой, обеспечив тем самым возникновение циркуляционного «свободного движения газов» в колпаке. В противном случае горячие газы 5, всплыв к потолку колпака, образуют там «мешок неподвижных горячих газов» (застойную зону), не остывающий, и не опускающийся, и не впускающий новые порции свежего горячего воздуха.

Процесс первичного «свободного» всплывания горячего газа в холодном газе за счёт архимедовых сил описывается формулой «для дымовой трубы» $V^2 = 2gh(T_Г - T_Х)/T_Г$. При температуре $T_Г = 700^\circ\text{К}$ и холодного газа $T_Х = 400^\circ\text{К}$ скорость горячего газа по мере свободного разгона вверх может достичь величин порядка $V = 3$ м/сек уже на высоте $h = 1$ метр. Однако реальные скорости газов в дымовых трубах не столь уж значительны из-за сопротивлений (эти скорости легко оцениваются при наблюдении исте-

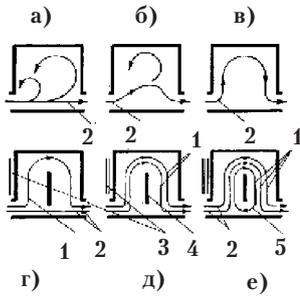


Рис. 127. Газодинамика безнапорных колпаков: а, б, в – транзитный газовый поток под холодным колпаком, а – холодный поток, б – тёплый поток, в – горячий поток, г, д, е – горячий газовый поток под колпаком с разной скоростью циркуляции газа внутри колпака, г – низкая естественная циркуляция за счёт электронагревателя малой мощности, д – средняя циркуляция от электронагревателя средней мощности, е – сильная циркуляция от электронагревателя большой мощности. 1 – циркуционный поток, 2 – сквозной транзитный поток в дымоходе, 3 – электронагреватель, создающий свободную конвекцию (циркуляцию газа) внутри колпака (число линий характеризует мощность тепловыделения), 4 – возможный рассекатель – перегородка, 5 – встречный поток в дымоходе.

чения дыма в атмосферу из трубы на крыше). В колпаках скорости газов ещё ниже, поскольку газы не просто остывают по пути, смешиваются и взвихриваются, но и тормозятся, сталкиваясь с потолком колпака (разворачиваясь). По экспериментальным оценкам скорости самостоятельного свободного подъёма горячего дыма в нижние «топочные колпаки» (а по-существу не колпаки, а проточные дымоходы-дымообороты, см. далее) составляют 0,5–1,0 м/сек, а в верхние «дымоходные колпаки» 0,1–0,5 м/сек (при скоростях в самих дымоходах до 4 м/сек).

Скорость горячего газа, «вольно» огибающего (обтекающего) внутренние стенки колпака и успевающего при этом охладиться, рассчитывается из формулы теплообмена $V_0 = \alpha(2H+a)C_p \rho v$, где $\alpha = 10$ Вт/м²·град – коэффициент теплопередачи, H – высота колпака, a – ширина колпака, v – глубина колпака, C_p и ρ – теплоёмкость массовая и плотность горячего газа. При кубической форме колпака $a=v=H$ скорость V_0 , при которой горячий газ успевает остыть в колпаке, составляет 0,1 м/сек. Именно при таких столь низких скоростях газа (обеспечивающих времена пребывания практически неподвижного газа в колпаке порядка 10 сек) свободный непроточный колпак становится проточным (способным пропустить через себя весь поступающий горячий газ за счёт «свободного движения газов») и начинает работать так, как считал Грум-Гржимайло (дым сигареты «вольно» поступающий в перевёрнутый стакан, вьётся у потолка, охлаждается и «вольно» покидает стакан «переливаясь» через его края). При более высоких скоростях горячий газ ведёт себя также, как струя фена, попадая в стакан и не успевая охладиться.

Оценить особенности «вольного» и «напорного» ввода можно очень легко: достаточно установить на оголовке дымящей дымовой трубы жестяной короб и проследить явления при вертикальном и горизонтальном

вводе дыма. Или же взять металлическую бочку (кастрюлю) или даже пустую картонную коробку (из-под телевизора, холодильника и т. п.), сделать внизу два отверстия (например, на противоположных стенках внизу бочки или коробки) и направлять в одно из отверстий разные струи горячего газа. Так, например, в случае струи горячего фена (с расходом воздуха 30–70 м³/час, обычно близким к расходу воздуха в печах), и коробка, и бочка будут нагреваться сильнее у выходного отверстия, чем на потолке. А если в бочку направить струю от газовой горелки кухонной плиты (имеющую ту же тепловую мощность, что и фен, но повышенную температуру и соответственно пониженный расход), то нагреваться будет преимущественно потолок бочки.

Поясним работу идеальной схемы колпака (застойной зоны) в точной сети (рис. 127). Если поток газов 2 холодный и проходит под столь же холодным колпаком, то поток газа 2 не всплывает, но может, газодинамически расширяясь, сталкиваться с задней стенкой колпака, отражаясь назад, образуя в колпаке слабую циркуляцию (крупномасштабную турбулентность) «против часовой стрелки» (рис. 127а). Если же поток газов 2 тёплый, то он не только расширяется, но и всплывает, сталкивается с задней стенкой также с образованием вихря «против часовой стрелки» (рис. 127б). Эти режимы соответствуют турбулентной смеси-тельной вентиляции колпака (см. рис. 51б). Если поток газов 2 очень медленный и очень горячий, то он энергично всплывает, образуя огибающий весь колпак циркуляционный поток «по часовой стрелке» (рис. 127в). Этот режим соответствует вытеснительной вентиляционной схеме и даже сквозняку (рис. 51а), и именно его имеют в виду ученики Грум-Гржимайло, говоря о колпаках и «вольных» движениях газов. При этом необходимо учитывать, что вязкость газов растёт с температурой, что препятствует развитию турбулентности (рис. 69).

Аналогичные рассуждения справедливы и при анализе влияния величины скорости горячего воздуха в канале 2. При большой скорости горячие газы попросту не успевают войти в колпак (рис. 127а) и проскакивают мимо. А вот при очень низкой скорости горячие газы имеют возможность беспрепятственно и полностью поглотиться колпаком (рис. 127в). Поэтому считают, что общая теория печей Доброхотова относится к энергичным печам с большими скоростями движения газов, а гидравлическая теория печей Грум-Гржимайло относится к слабощеным печам (режимам тления дров) с малыми скоростями газов.

Наиболее наглядно работа ламинарного «свободного» безнапорного колпака иллюстрируется в схемах с возрастающей скоростью циркуляции (рис. 127г, д, е). Здесь интенсивность потоков обозначена числом линий со стрелками 1 и 2: «однострелочный» поток является самым сла-

бым, «двухстрелочный» – умеренным (средним), «трехстрелочный» – сильным. Если собственная внутренняя циркуляция в колпаке развита слабо («однострелочная» траектория 1), например, за счёт слабого электроконвектора 3, то циркуляционный (круговой) поток 1 «зануляет» лишь часть транзитного потока 2 так, что внизу колпака в проточном канале остаётся лишь одна стрелка (рис. 127г). Если объёмную скорость циркуляции увеличить до «двухстрелочного» уровня, то весь транзитный поток 2 переходит в циркуляционный поток 1 (с полной компенсацией встречных потоков внизу колпака), что отвечает чисто вентиляционному режиму (рис. 53) при полном отсутствии транзитного потока в канале под колпаком (рис. 127д). Если объёмная скорость циркуляции увеличится до «трёхстрелочного» уровня и превзойдёт скорость транзитного потока, то в канале может появиться встречное течение, то есть внутренний вихрь «вылезет» в канал и будет работать как противоточный насос (рис. 127е).

5.7.8. Проточные полости

К сожалению, серьёзных экспериментальных исследований газодинамики печных колпаков до сих пор нет. Отчасти это объясняется отсутствием практического интереса к «свободным» беспроточным колпакам: ведь даже самые рьяные поклонники систем «свободного движения газов» почему-то стараются (порой неосознанно, интуитивно) «загнать» дым в колпак (верхний) отнюдь не «свободно» («самотёком» под действием сил гравитационного всплывания), а именно за счёт высокой скорости дымовых газов - в фонтане за сужением (рис.118а). То есть, во-первых, принудительно за счёт напора в печной системе (за счёт разряжения в печной трубе), а во-вторых, именно вертикально снизу вверх (по ходу дыма в вертикальном переточном дымоходе), а не горизонтально (когда «вольные» движения всплытия проявились бы на фоне «принудительных» движений вдоль тракта печи). Принудительный ввод горячего газа в колпак (тем более секционированный) полностью перечёркивает при этом заявляемую возможность сепарации в колпаке горячих и холодных струй. При этом сами «колпаковые» системы теряют образ истинных колпаков (перевёрнутых стаканов с одним отверстием) и приобретают вид замкнутых сосудов с двумя (в том числе несимметричными) отверстиями: входным и выходным (рис. 126г, д, е).

Как мы уже отмечали, любая трубная печная система (даже «бесканальная» колпаковая по ГОСТ 2127-47) представляет собой последовательность каналов и расширений каналов (полостей). Через эту последовательность каналов и полостей течёт сквозной (транзитный) поток

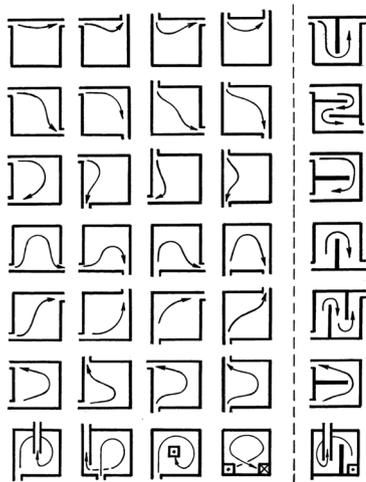


Рис. 128. Перечень схем напорных полостей – замкнутых проточных сосудов с двумя отверстиями (входным и выходным).

газов под действием тяги (разряжения) дымовой трубы. Как и любой газовый поток, сквозной поток является замкнутым (циркуляционным), но замыкается он вне печи в объёме атмосферы: он входит в поддувало, проходит каким-то образом через печь, выходит из дымовой трубы в атмосферу, там перемешивается с воздухом атмосферы (как в очень большой полости) и затем вновь входит в поддувало. Анализ этой замкнутой траектории бывает очень полезным при выявлении особенностей

тяги дымовых труб, дымлений печи, опрокидывания тяги в сырую или жаркую погоду и т. д.

Каналы печей представляют собой наиболее узкие коммуникации печей. Поток в них считается однонаправленным и по-существу совпадающим по смыслу с понятием сквозного потока. Каналы могут разветвляться на некие параллельные каналы (или комбинации параллельно-последовательных каналов), в которых течения считаются также однонаправленными. Каналы могут и расширяться, образуя проточные полости. Если в проточной полости нарушается однонаправленность потока (например, за счёт циркуляций), то такие расширения будем считать полостями с застойными зонами (в том числе, вихревыми).

Нарушение однонаправленности означает появление взаимно контактирующих встречных течений. Поэтому чем горячее газы, тем выше их вязкость, и тем сложнее возникают встречные течения. Аналогично, чем более энергичны течения в объёме, тем более вероятны встречные течения, поскольку кинетические энергии (скорости) встречных газовых потоков могут преодолевать «слипающие» воздействия вязкости. Поэтому появление встречных течений следует в первую очередь ожидать в крупных полостях при значительных скоростях ддува (или при наличии высоких скоростей свободноконвективных потоков из-за больших перепадов температур).

Сквозные потоки выступают как принудительные по отношению к самой проточной полости, поскольку обусловлены внешним воздействием тяги дымовой трубы. Внутренние же встречные (циркуляционные) потоки, замыкающиеся в круговое движение в пределах самой полости, явля-

ются как бы «свободными» в том смысле, что они существуют независимо от сквозного (принудительного) потока. Эти «свободные» движения газов обычно отождествляют в печах со свободноконвективными потоками, возникающими от нагрева газов горячими поверхностями (стенками топливника, углями), пламенами, тепловыми излучениями, но они могут возникать и по иным причинам (например, из-за наличия в полостях механических вентиляторов). Естественно, сквозные («принудительные») и внутренние циркуляционные («свободные») потоки могут механически взаимодействовать, формируя некоторое добавочное газодинамическое сопротивление сквозному потоку. Ясно, например, что если сквозной поток, входя в колпак, взвихривается (переводя свою кинетическую энергию поступательного движения в кинетическую энергию вихрей), то это воспринимается как торможение потока, как некое местное газодинамическое сопротивление.

Проточные полости печей газопроводного типа являются замкнутыми (находящимися под давлением или под разрежением) ёмкостями (сосудами) с двумя (или несколькими) отверстиями. В отличие от беспроточных полостей проточные полости не могут иметь только одно отверстие (как идеальный колпак – перевёрнутый стакан).

Анализируя аэродинамическую обстановку в полостях, печники в первом приближении «рисуют» (скорее интуитивно) некие траектории транзитного (сквозного) протока газов через полость (на основе личного опыта наблюдений за водными потоками), руководствуясь тем, что газ стремится идти по кратчайшему пути (рис. 128). Затем «нарисованные» тем или иным образом простейшие «стрелочные» траектории уточняются печником с учетом инерций газовых потоков (струй), мысленно дополняются завихрениями, в том числе и при эжекции (подсосу) газов в затопленную струю (см. ниже) и при взаимодействии встречных течений, а также всплываниями в случае высокой температуры входящего газа и погружения газов, охлаждающихся на холодных стенках. Большую методическую помощь при анализе схем могут оказать изыскания С.М.Миркиса «Указатель проектов печей и каминов, опубликованных в России за последние 100 лет», СПб., 2006г.

Часто при интуитивном конструировании проточных полостей печники стремятся в первую очередь мысленно заполнить всю полость горячими газами или увеличить длину траектории горячих газов. В действительности же, более целесообразно попытаться направлять сквозной поток горячего газа через полость так, чтобы он омывал все необходимые поверхности (даже в закоулках), набегал на все целевые теплосъёмные элементы (варочные плиты, духовки, каменки, баки с водой и т. д.). Так, даже в каминах необходимо омывать горячими газами

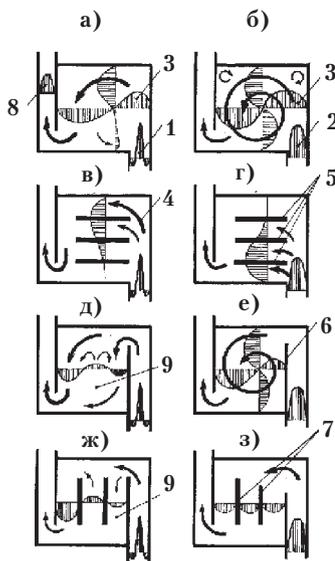


Рис. 129. Возможные особенности газовых течений в полости типа «колпак Подгородникова» (рис. 118б): 1 – медленный ввод горячего газа, 2 – быстрый ввод горячего газа, 3 – пространственное распределение (эпюра) скоростей дымовых газов, 4 – траектории (направления) дымовых потоков, 5 – горизонтальные расщечки, 6 – вертикальная расщечка, переводящая колпак в «режим противотока», 7 – вертикальные расщечки, 8 – дымовая труба, 9 – нисходящий канал.

именно заднюю стенку, чтоб она максимально разогрелась и максимально затем излучала (а не «отражала лучи огня», как часто утверждают в литературе, поскольку кирпич в ИК-спектре теплового излучения не обладает отражательными свойствами). Поэтому в каминах

заднюю стенку делают нависающей, причем хорошо обтекаемой (гладкой без каких-либо углублений, способных стать плохонагреваемыми застойными зонами) и ничем не загораживаемой.

В отопительных печах наиболее важен равномерный нагрев всех стенок печи. Этого добиваются, в частности, с помощью различного рода расщечек (рассекателей, столбиков, стенок), по-существу превращая полость в многооборотные дымоходы (см. правый столбец рис. 128), в которых скорости всплытия горячих газов уже пренебрежимо малы по сравнению со скоростями транзитного потока и не играют никакой роли. Отметим, что транзитные горячие газы, стремясь идти по кратчайшему пути, наиболее сильно нагревают края преград (огибаемые перевалы и подвертки), в том числе и входы в каналы. Действительно, если подвесить в порядке эксперимента кирпич плашмя над газовой горелкой кухонной плиты, то легко убедиться, что края (ребра) кирпича, обтекаемые с большой скоростью горячим газом, нагреваются сильнее (докрасна), чем центр низа кирпича, расположенный непосредственно над пламенем, но в зоне низких скоростей обдува. Поэтому зоны перевалов, подверток и заужений во избежании локальных перегревов и термических растрескиваний следует футеровать с термокомпенсационными разрезами и повышенным теплоотводом в массив печи и, кроме того, при необходимости скруглять ребра для повышения теплоотвода с одновременным снижением газодинамического сопротивления.

Равномерность нагрева может достигаться и интенсивным перемешиванием газов в полости за счет большой величины линейной скорости входа газа в полость. Часто отмечают, что колпаковые полости (но не топливники) с энергичным вводом горячего газа разогреваются (вопреки гидравлической модели) на удивление однородно даже тогда, когда в отсутствии рассечек входное и выходное отверстия (патрубки) находятся вблизи друг от друга на одной стороне полости. При этом необходимо учитывать, что при температурах стенок выше 200–300°С теплообмен внутри полости является преимущественно радиационным. Поэтому, если одна из стенок полости загорожена каким-либо экраном, например, стенкой газоотводящего (переливного) канала, то она может быть холоднее других, хотя может и находиться в потоке горячего газа. Вследствие этого каналы (ввода и выда газов) желательно не монтировать на тепловоспринимающих стенках полостей, а располагать в глубине в осевых зонах печи.

Особой разновидностью проточных полостей с хорошо обдуваемыми стенками является цилиндрические полости с центробежной (тангенциальной) круткой газа вокруг оси полости. При этом горячий лёгкий газ «всплывает» (центруется) на ось полости в виде шнура, отделённого от стенок. Это ухудшает теплообмен, но бывает полезным для устранения перегревов наиболее энергонапряжённых узлов (топок). Широко известны центробежные топки для сжигания мусора, веток, опилок, щепы, соломы. Из таких топок не вылетает «ни одной искры», поэтому подобные изделия могут использоваться даже для подогрева палаток (печь «Циклон») и для искроулавливающих экономайзеров (дополнительных теплообменников) на дымовых трубах (Л.А. Семёнов, Печное отопление, М.: Стройиздат, 1968 г.).

Наиболее распространённой в России печной теплосъёмной полостью остаётся «колпак Подгородникова» (второй ярус), который выполняется печниками в громадном разнообразии вариантов (рис. 118б). Обязательным условием успешной работоспособности такого «колпака» (а фактически замкнутого проточного объёма с двумя отверстиями) считается подача горячих дымовых газов в колпак строго снизу вверх дальнобойной струей (за счет разгона сквозного потока естественной тягой дымовой трубы). Ясно, что печник при этом должен решить, что он хочет в колпаке нагревать - то ли преимущественно некий локальный целевой элемент, размещенный в колпаке (например, духовку), то ли равномерно все стенки колпака. От этого и будет зависеть конструкция колпака.

При большом отверстии, малой тяге и соответственно малом расходе дыма (например, при растопке печи или догорании углей) дым 1 лениво поднимается вверх 3, заполняя верх колпака, затем где-то там охлаждает-

ся (с нагревом преимущественно потолка) и уходит в дымовую трубу 8 (рис. 129а). Это соответствует представлениям Подгородникова и отвечает, как мы установили, скоростям газов в колпаке менее 0,1 м/сек.

С разгоранием печи скорость поступления и температура дыма возрастают 2 (рис. 129б). Здесь уже можно выделить две взаимодополняющих тенденции: ведущая роль температурного фактора и ведущая роль скоростного (расходного) фактора. Поясним это на простом житейском примере. Представьте себе, что вы приехали зимой на дачу и включили в комнате масляный обогреватель. Горячий воздух поднимается вверх и, не охладившись там, не спустится вниз. При массивности потолка и/или при его плохом утеплении вам, может быть, так и не удастся нагреть комнату, во всяком случае внизу в зоне обитания (пребывания). Попробуем изменить характеристики обогревателя, но с сохранением мощности нагрева. Это можно сделать двумя путями: увеличив температуру нагреваемого воздуха при одновременном снижении расхода (скорости подачи) воздуха, или уменьшив температуру нагрева воздуха при одновременном повышении расхода воздуха. Так, заменяя масляный обогреватель на электроплитку той же мощности (с открытой электрической спиралью или с ТЭНом), мы получим повышение температуры воздуха, поднимающегося над плиткой с одновременным снижением массового расхода воздуха ввиду малости размера плитки. При этом мы получаем ещё более мощный нагрев потолка как по причине большей удельной теплоотдачи (ввиду более высокой температуры поднимающегося воздуха), так и по причине малой скорости циркуляции газов в помещении. Такой режим характерен для саун и соответствует перегреву потолка, в том числе перегреву перекрытия (перекрыши, свода) колпака. С другой стороны, масляный обогреватель можно дополнить электровентилятором с тем, чтобы температура струи горячего воздуха понизилась, а расход воздуха в струе повысился, но чтобы тепловая мощность струи нагретого воздуха вверх осталась бы на прежнем уровне. В этом режиме весь воздух в помещении перемешается, и температура во всём помещении станет практически одинаковой (но пониженной по сравнению с температурой потолка в других рассмотренных режимах), а это значит, что и в колпаке при больших расходах газа температура стенок будет одинаковой (перегрев свода отсутствует). Это реализуется, в частности, при использовании тепловых завес и тепловых пушек.

Таким образом, малая линейная скорость ввода горячего газа в колпак приводит к преимущественному нагреву перекрытия. С увеличением линейной скорости ввода, а также с увеличением объемного расхода газа равномерность нагрева стенок полости повышается. Но в случае большой дальнобойности горячей струи $6d$, где d - диаметр (калибр)

отверстия, возможен преимущественный нагрев пятна контакта горячей струи с преградой (например, противоположной стенкой). Поэтому газ в полость предпочтительней вводить через несколько мелких «душирующих» отверстий (при возможности), что уже соответствует приближению к вытеснительной схеме «вентиляции» полости.

Для ориентировки сопоставим время пребывания дыма в колпаке с временем остывания дыма в колпаке. За основу возьмём проектные данные Подгородникова: размер колпака 0,75x0,75x0,70 м (итого объём 400 литров) при паспортной теплоотдаче печи 4000 ккал/час (4,5 кВт) при двух топках в сутки. Это соответствует средней мощности пламени в топке порядка 30–40 кВт при среднем расходе воздуха порядка 100 м³/час (в расчёте на нормальные условия воздуха 20°С и 1 атм). В реальности это значит, что расход воздуха в ходе топки (и растопки) может «плавать» в пределах условно от нуля до 200 м³/час, что соответствует временам пребывания дыма в колпаке при 400°С порядка 6 сек.

Если переточный канал 1 выполнить сечением 0,25 м² (то есть в половину поперечного сечения колпака, что было бы вполне разумно в рамках гидравлической модели), то средняя линейная скорость (сквозная) газов в колпаке составляла бы 0,1–0,2 м/сек и обеспечила бы (в среднем) удовлетворительную теплоотдачу в холодные стенки колпака. Однако в самих же колпаках на этапе растопки (при холодном ещё колпаке) скорости свободного всплывания горячих газов (дыма) могут достигать 0,5 м/сек, что вызывает неоднородность поля скоростей во входящей струе 1. Кроме того, на этапе интенсивного горения линейные сквозные скорости газов могут достигнуть тех же 0,5 м/сек, что сделает теплосъём колпака малоэффективным.

Если же переточный канал 1 выполнить с зауженным поперечным сечением 0,03 м² (0,12x0,25 м), то это увеличит сопротивление печного газового тракта, но зато увеличит линейную скорость ввода газов в колпак до 2–4 м/сек. А каковы линейные скорости ввода газа, таковы и скорости циркуляции газа (крутки) в аппаратах (хотя времена пребывания газа в колпаке не изменяются, поскольку определяются не линейными скоростями ввода газа, а объёмным расходом газа). Столь значительные скорости газа заметно изменяют значение коэффициента теплопередачи $\alpha = (10 + 6V)$. Необходимые для эффективного теплосъёма времена пребывания снижаются с 10 сек до 3 сек (примерно), и колпак уже становится работоспособным на этапе интенсивного горения. Для типичных дачных печей с теплоотдачей порядка 2 кВт оптимальный размер колпаков составляет 0,25x0,50x0,75 м с вводом газов вдоль длинной оси через отверстие 0,25x0,13 м.

Расщелины в полостях могут играть роль газонаправляющих (распределительных) элементов, в том числе и рассекающих направленные газовые потоки, а также выполнять теплосъёмные функции (если способны аккумулировать тепло или передавать тепло, в том числе в лучистом виде, в целевые зоны энергопотребления). Все разработчики колпаковых печей охотно заполняют верхние колпаки столбиками, углублениями-закрутками, превращая их по сути в проточные секционированные теплообменники, видимо, сомневаясь (интуитивно) в выдающихся теплосъёмных свойствах самого «колпака Подгородникова». Реже всего используются горизонтальные расщелины, хотя именно они обеспечивают наибольшую «колпаковость» колпака (за счёт подавления крутки) и обладают наилучшими теплосъёмными свойствами (рис. 129в, г). Во многом это обусловлено и чисто конструктивными причинами, поскольку только вертикальные столбики способны держать перекрытие колпака.

Вообще говоря, применяя колпак, печники чаще всего в глубине души признают его достоинства прежде всего в его перекрытии (своде). Именно к перекрытиям (сводам) всегда прижимаются горячие газы и в колпаках (рис. 129в), и в горизонтальных каналах. Именно перекрытия нагреваются зачастую лучше и быстрее всего, но нагреваются подчас неоднородно и местами чрезмерно, что приводит порой к опасному растрескиванию печей. Горизонтальные же расщелины можно делать «плавающими», скользкими по кронштейнам в стенах (в том числе и на металлических уголках-«полосьях»), не воздействующими при тепловом расширении механически на несущие стены печи. Другой недостаток горизонтальных каналов состоит в быстром засорении их дна сажей и пеплом (в том числе и через скапливание конденсата). Особенно плохую репутацию приобрели горизонтальные каналы в металлических дымоходах, эксплуатируемых зимой вне отапливаемого здания. Вместе с тем, с точки зрения экологии любой фильтр-улавливатель печного аэрозоля (сажи, пепла) является полезным.

Так или иначе, горизонтальные расщелины являются защитой свода колпака от горячих восходящих струй дыма (рис. 129г). Как при малых (рис. 129в), так и при больших (129г) расходах горячих газов, поведение колпака является неоднозначным, как в зависимости от режимных параметров, так и от особенностей конструкции. Если колпак является холодным (на этапе растопки печи), то газы идут в колпаке верхом (рис. 129в). Но если колпак уже горячий (на этапе догорания углей), то газы идут в колпаке преимущественно низом (прямотоком). На этапе интенсивного горения дров при максимальном расходе дымовых газов, газы в колпаке с горизонтальными расщелинами идут значительно ниже, чем в отсутствие расщелин: во-первых, потому, что направленные потоки при этом

отражаются вниз, а во-вторых, горячим вязким газам идти с большой скоростью по более длинному верхнему пути в «узилище» между горизонтальными рассечками просто газодинамически не выгодно.

Полное заполнение колпака горячими газами при любом расходе может быть обеспечено за счёт нижней вертикальной рассечки б с перевалом (рис. 129д–з). Такая рассечка характерна тем, что устраняет эжекцию газа со дна колпака во входящую струю (см. ниже). Иногда такую схему называют противоточной, но чаще всего вертикальной многооборотной. Колпак как полость превращается в систему вертикальных каналов (во всяком случае приближается к ней). Дополнительные вертикальные рассечки 7, не касающиеся ни дна, ни перекрытия колпака, ещё в большей степени рассеивают потоки и фактически воссоздают многооборотную схему с параллельными нисходящими дымоходами (рис. 129ж, з).

Таким образом, известные многоканальные схемы рождаются путём введения в колпаки (и в любые полости) газонаправляющих элементов (стенок, рассечек) для обеспечения более равномерного («размазанного») распределения газовых потоков.

Нисходящие (опускные) каналы 9 (и одинарные на рис. 129д, и параллельные на рис. 129ж) издавна считались (наряду со сводами) наиболее ценными теплосъёмными элементами печей. Считалось, что именно нисходящие каналы (даже большого поперечного сечения, то есть фактически полости) обеспечивают равномерный нагрев стенок и строгую однородность движения горячих газов (отсутствие «проскока» горячего газа через один из каналов). Предполагалось, что если в какой-нибудь точке нисходящего канала (или в одном из параллельных нисходящих каналов) скорость движения горячего газа вниз вдруг случайно возросла, то это приводило к уменьшению (?) скорости охлаждения газа, газ сохранялся бы более горячим и начинал как бы всплывать, восстанавливая (снижая) поступательную скорость своего движения вниз и обеспечивая саморегулирование скоростей (И.И. Свизов, Теоретические основания печного дела, 1867 г.). Видимо абстрактно считалось, что чем дальше газ находится в нисходящем канале, тем лучше он остывает.

К сожалению, это распространенное и крайне упрощённое объяснение не является сколько-нибудь корректным. Оно отражает лишь простейшую мысль о том, что «горячий газ всегда стремится вверх» (даже навстречу потоку), и описывает свободную конвекцию. В действительности же, горячий газ в каналах движется за счёт тяги дымовой трубы со значительной скоростью 2–4 м/сек и на него не могут существенно повлиять слабые свободноконвективные потоки со скоро-

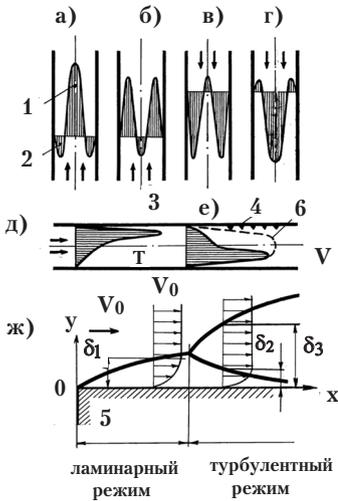


Рис. 130. Пространственные распределения (эпюры) скоростей газовых потоков: а–е – распределения по радиусу цилиндрических каналов (труб), а – горячий газ в холодных стенках снизу вверх, б – холодный газ в горячих стенках снизу вверх, в – горячий газ в холодных стенках сверху вниз, г – холодный газ в горячих стенках сверху вниз, д – распределение температуры горячего газа в холодной горизонтальной трубе, е – распределение скорости горячего газа в холодной горизонтальной трубе, ж – схема образования турбулентного течения у поверхности. 1 – «язык» горячего газа вверх (например, пламя), 2 – проседание охлажденного газа вниз, 3 – стрелки показывают направление движения газа, 5 – поверхность с углом, у которой начинает развиваться пограничный слой, 6 – типичное распределение скоростей в трубах (параболическое) в изотермическом ламинарном

потоке, y – координата, перпендикулярная поверхности (устанавливающая удаление трубок тока газа от поверхности), T – температура, V – линейная скорость, δ_1 – увеличивающаяся толщина ламинарного пограничного слоя, δ_2 – уменьшающаяся толщина ламинарного пограничного слоя, δ_3 – увеличивающаяся толщина турбулентного пограничного слоя.

стями 0,1–0,5 м/сек. Однако, если опускной канал очень широкий (или опускных каналов много) и линейная скорость движения газов очень мала (например, на этапе растопки), то свободноконвективные явления уже подлежат учету. При этом надо исходить из того, что горячий газ в нисходящем канале движется в окружении холодных стенок. Охлаждаясь именно у стенки, газ начинает «проваливаться» вниз, ускоряясь и увеличивая (за счет скорости обтекания стенок) теплотдачу, что приводит к ещё более сильному охлаждению и увеличению скорости «проваливания», в том числе и из-за снижения вязкости газа при снижении температуры (рис. 130в). Так что поток горячего газа в холодном нисходящем канале неустойчив так же, как поток горячего газа в холодном восходящем канале (рис. 130а). Вопросы устойчивости (пульсаций и проскоков) течений в параллельных каналах очень актуальны во многих областях техники. Они решаются в первую очередь увеличением и выравниванием величин перепадов давления на всех каналах, для чего до и после параллельных каналов обустраиваются демфирующие полости большого (по сравнению с каналами) объема (ресиверы). Иногда в печах по результатам испытаний приходится делать разновысотные вертикальные разделки нисходящих параллельных дымоходов (рис. 129з).

Чем меньше вязкость газа (то есть, чем холодней газ), тем больше вероятность возникновения разнонаправленности потоков (в том числе и турбулентностей). Для качественной оценки ситуации в канале необходимо сопоставить импульс газа (инерцию) ρV^2 с силой противодействия встречному движению (то есть с силами вязкости) $\mu dV/dx = \rho \nu V/L$, где L – поперечный размер канала. Полученное отношение $Re = VL/\nu$ называется числом Рейнольдса. Оно, образно говоря, показывает время (продолжительность), за которое встречные потоки станут спутными, то есть как быстро силы вязкости подавят встречные движения газов. Малое число Рейнольдса означает, что встречные потоки погасят сами себя быстро и превратятся в спутные. То есть малые числа Рейнольдса отвечают не просто ламинарным потокам, но и обязательно спутным (при наличии непосредственного контакта потоков). Отсюда следует, что при фиксированной линейной скорости V малым диаметрам каналов отвечает однонаправленное движение, а большим диаметрам полостей отвечает возможность разнонаправленных движений газа. Однако, если мы выразим число Рейнольдса $Re = G/L\nu$ через объёмный расход газа $G = VL^2$ (сохраняющий свою величину при переходе газа из канала в полость), то получим обратный (и очень удивительный) результат: в последовательно соединённых каналах и полостях ($G = \text{const}$) встречные потоки (турбулентности) будут гаситься дольше в каналах (с малым L), чем в полостях (с большим L). То есть газ, подвергнутый (может быть, и многократно) механическому возмущению в какой-либо точке, «успокаивается» быстрее в полости, чем в канале. В соответствии с этим и турбулентность, появляющаяся при $Re = 1000 - 3000$, возникает при разгорании печи вначале в каналах, и лишь потом в расширениях, а в крупных полостях может не возникнуть вовсе. Это уже совсем необъяснимый вывод - ведь раньше мы считали, что именно в каналах газ движется всегда в одну сторону.

Противоречие снимается тем, что мы рассмотрели чисто изотермическую инерционную модель последовательных каналов и полостей, когда температура газа (дыма) строго равна температуре стенок. Действительно, в таких системах пульсации газа в трубах затухают медленнее, чем в сосудах (ресиверах). Это известно в быту на примере автомобильных глушителей, где труба хорошо передает рёв выхлопа двигателя, а расширения трубы (в том числе тупиковые ответвления – резонаторы) гасят его. Поэтому, запомнив для последующего анализа, что инерционные турбулентности возникают вначале именно в каналах, мы должны рассмотреть и случай крупномасштабных турбулентностей (свободноконвективных циркуляций), обусловленных тем, что температура дыма вы-

ше температуры стенок (в противном случае дым не будет ни всплывать, ни охлаждаться).

Сопоставим силу Архимеда (всплытия) $(\rho_x - \rho_r)gH = \rho gH\Delta T/T$ с силами вязкости $\rho vV/L$, где ΔT – разница абсолютных (в градусах Кельвина) температур газа и стенок, H – высота полости (колпака), L – размер проходного сечения потока газа. Полученное отношение $G_r = gHL\Delta T/vVT = gHL^3\Delta T/vGT$ называется числом Грасгофа и показывает, насколько активно могут развиваться свободно-конвективные потоки. Большие значения G_r отвечают «активному» и «свободному» колпаку, в котором всё бурлит от «свободного движения всплывающих газов», малые значения G_r отвечают «мёртвому» колпаку, «свободные» (то есть нетранзитные) движения газа в котором можно поддерживать лишь за счёт внешних воздействий, например, вдуваний в него дыма под напором дымовой трубы или перемешиваний мешалкой (газодувкой).

Видно, что при равенстве температур газа и стенок $\Delta T=0$ колпак «мёртвый». С увеличением высоты колпака H и особенно с ростом поперечного проходного размера L свободная конвекция усиливается. При общем увеличении уровня абсолютных (в градусах Кельвина) температур газа и стенок $T=(T_x+T_r)/2$ активность колпака снижается. И наконец, чем выше вязкость газа (то есть, чем выше температура газа), тем большее сопротивление встречают свободно-конвективные потоки.

Рассматривая случай последовательного подключения канала и полости (колпака), соответствующий случаю $G=\text{const}$, видим, что свободно-конвективная активность очень быстро растёт с объёмом колпака и с проходным сечением. Поэтому даже при расширениях всего в 2–3 раза канал многократно повышает свою «колпаковость». Это значит, что в широких нисходящих и восходящих вертикальных каналах могут существовать встречные потоки, особенно при малых расходах дыма (больших G_r). Так, при подъёме горячих газов вверх по холодной трубе возникают встречные нисходящие потоки охлаждающихся у стенок газов, известные на примере каминов (рис. 130а). При подъёме же холодных газов вверх по горячей трубе могут возникать встречные нисходящие (противоточные) потоки по оси, фактически «тонущие» в активно нагревающихся у стенок газах (рис. 130б). В горизонтальных каналах горячий газ прижимается к «потолку» (рис. 130д). Поскольку горячий дым имеет высокую вязкость, то обычное параболическое распределение скорости дыма b может видоизмениться в сторону преимущественного течения в нижней части канала (рис. 130е). Этим, видимо, можно объяснить феномен, когда рукой чувствуешь горячий дым в канале только у «потолка», но тем не менее, расчищая дно канала от завалов пепла и сажистых спёков, вдруг неожиданно для себя получаешь многократное усиление тяги, причём

без заметных изменений состояния горячего газа у «потолка» канала. При увеличении расхода дыма число Грасгофа уменьшается, и течения дыма приобретают «обычный» вид однонаправленных и более-менее однородных по сечению канала потоков, особенно при развитии турбулентности.

Турбулентность течений проявляется в увеличении теплопередачи в каналах с одновременным увеличением сопротивлений трения. Что касается полостей, то обычная пристеночная турбулентность в них развивается при значительно более высоких расходах дыма (чем в каналах), но зато появляется ещё один вид неустойчивостей – турбулентность за счёт возникновения затопленных струй. Поэтому рассмотрим три вида турбулентностей: турбулентность потока у поверхности (возникающую вначале на стенках каналов и создающую сопротивление трения), турбулентность при поворотах потоков (создающую местное газодинамическое сопротивление канала) и турбулентность затопленной струи (возникающую при резком переходе газ из узкого канала в широкую полость и создающую местное газодинамическое сопротивление полости).

Напомним, что газовый поток, входя в контакт с поверхностью, начинает замедляться у поверхности за счёт вязкостных сил, создавая ламинарный пограничный слой δ_1 (рис. 130ж). По мере увеличения толщины ламинарного пограничного слоя увеличивается и толщина теплового пограничного слоя, в котором наблюдаются изменения (перепады) температур газа у поверхности (неизотермический случай). В результате постепенно снижается и коэффициент трения (из формулы $\Delta p = \xi \cdot \rho V_0^2 / 2$) и теплопередача. Коэффициент диффузии (молекул воздуха – азота и кислорода) в воздухе $D = 0,19$ см²/сек очень близок к коэффициенту вязкости воздуха $\nu = 0,23$ см²/сек и к коэффициенту теплопроводности воздуха $\alpha = 0,31$ см²/сек, что указывает на одинаковую природу процессов массопереноса (диффузии), вязкости и теплопроводности. Поэтому и толщины пограничных слоёв для диффузии, вязкости и теплопроводности можно считать близкими. Близкими они остаются, видимо, и при развитии турбулентности.

Турбулентность возникает на границе ламинарного слоя и распространяется как к поверхности, так и от поверхности (рис. 130ж). Поэтому толщина ламинарного слоя δ_2 уменьшается, толщина турбулентного слоя δ_3 увеличивается. Для ориентировки укажем, что в ламинарном режиме сопротивление потоку изменяется пропорционально $x^{-0,5} V_0^{1,5}$ (см. соответствующее соотношение $V = (\Delta p)^{0,67}$ на стр. 62 и стр.160), а коэффициент теплоотдачи пропорционально $x^{-0,5} V_0^{0,5}$. В турбулентном режиме указанные зависимости приобретают вид $x^{-0,2} V_0^{1,8}$ и $x^{-0,2} V_0^{0,8}$ соответственно. Это значит, что при увеличении расхода воздуха

сопротивление печи возрастает намного быстрее, чем теплоотдача от дыма в стенки каналов.

Особую важность имеет шероховатость поверхности канала 4 (рис. 130е). Если выступы шероховатости не вылезают за пределы ламинарного слоя δ_2 , то основной вклад в процесс торможения вносит именно ламинарный вязкий слой, дающий малое сопротивление и работающий как «смазка». Если же выступы шероховатости вылезают в турбулентный слой δ_3 , то сопротивление движению резко увеличивается (эффект Никурадзе) так, что коэффициент сопротивления трения ξ перестаёт зависеть от V_0 , то есть перестаёт падать с увеличением значений линейной скорости потока V_0 . Соответственно, наблюдавшееся при ламинарном режиме снижение коэффициента теплопередачи (вдоль оси x) заменяется на резкое возрастание. Например, шероховатость кирпичной кладки официально принимается равной 0,8–6 мм, так что на практике турбулентность всегда достигает выступов шероховатости, и, как правило, сопротивление каналов турбулентному потоку велико. Шероховатость металлических труб принимается на уровне 0,02–0,07 мм (новые) и 0,2–0,5 мм (после эксплуатации), поэтому их сопротивление существенно меньше (до ста раз по формуле Никурадзе). Но при этом снизится и теплопередача. Отметим попутно, что для повышения теплопередачи часто используется оребрение поверхности. При этом максимальная эффективность оребрения достигается при высоте рёбер $h=0,3a$, где a – расстояние между гранями соседних рёбер (СНиП 23-02-2003), причём расстояние между рёбрами составляет 1–10 см. При большой высоте рёбер теплоотдача уменьшается из-за застоя газа в зазорах (как в полостях стеклопакетов окон).

Рассматривавшаяся турбулентность развивается на стенках прямых каналов печей или во всяком случае со сглаженными (скруглёнными) поворотами (рис. 131б). Но реальные каналы могут иметь резкие повороты, возникающие, например, из-за технологических особенностей изготовления печей (сварка металлических листов, кладка прямоугольного кирпича и т. п.). Ясно, что схема на рис. 131а получается из схемы на рис. 131б, если заменить скругления дымоходов коробами 1. При этом возникают застойные зоны, в которых возникают турбулентности иного типа, нежели развивающиеся на поверхности (рис. 130ж). В местах резких поворотов газ взвихривается, поступательная скорость движения газа преобразуется в скорость крутки газов в хаотических вихрях, поэтому скорость потока в канале снижается, что и воспринимается нами как сопротивление потоку. Такое сопротивление и называется местным газодинамическим сопротивлением. Вихри срываются с кромок поворотов и увлекаются потоком, усиливая турбулентность не только в месте пово-

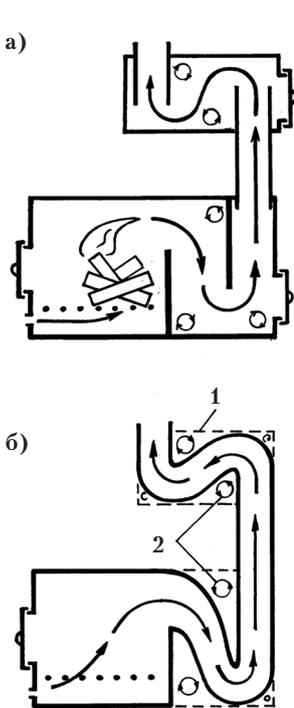


Рис. 131. Модели металлических печей с дымооборотами (А.М. Андреев, Садовая баня и её загадки, М.: Эксмо, 2007 г.): а – с расширительными полостями («колпаковая» схема), б – без расширительных полостей (канальная многооборотная схема). 1 – достраиваемая конфигурация полостей, 2 – зоны турбулентностей, возникающих после достраивания колпаков.

рота, но и на некотором расстоянии вниз по потоку. Так что местное газодинамическое сопротивление «размыто» по каналу вслед за поворотом.

Отметим, что в застойных вихревых зонах тепловые нагрузки на стенки, как правило, малы, что используется, например, для уменьшения короблений углов и ребер металлических печей. Вихревые же явления в потоках (турбулентности) повышают тепловые нагрузки на стенки каналов. Так что печь на рис.131б обладает большей теплоотдачей и меньшим

сопротивлением, чем печь на рис.131а.

5.7.9. Турбулентные струи в полости

Более сложная картина возникает при резком (неплавном) переходе потока из канала в полость. При этом возникает струя газа и ещё одно явление турбулентного типа. Дело в том, что полость - это большое количество неподвижного газа, который может турбулентно подмешиваться в поток, а в застойных зонах на рис. 131 объемы газа малы, и они постоянно обновляются за счет поступления направленного потока и уходом взвихренного потока.

Газовый поток, вырывающийся из трубки в открытое пространство (заполненное тем же газом, из которого состоит сам поток), называется свободной затопленной струей (рис. 49). Наиболее важной особенностью затопленных струй является образование газодинамически неустойчивой границы между неподвижным и подвижным газом, которая взвихривается и образует всё более расширяющийся конусом пограничный слой



Рис. 132. Схема образования турбулентно-пограничного слоя в составе свободной затопленной струи. Крупные белые стрелки – вихри газа струи. Крупные чёрные стрелки – вихри подсосываемого (эжектируемого) газа.

- так называемый турбулентный след струи (рис. 132). При этом струя как бы «всасывает» внешний газ, а на самом деле просто смешивается и за счёт своей инерции подталкивает ранее невозмущенный газ. Объёмы захватываемого в движение (эжектируемого, подтекающего, всасывающегося) газа могут многократно превышать объёмы газа, истекающего из канала и зависят от геометрии ввода. Так, например, рис. 129е отличается от рис. 129б именно отсутствием подсосов у дна колпака. Подсос исчезает (а струя разрушается) и при плавном расширении канала в полость.

Если газовая струя является горячей и вырывается в холодный газ, то струя горячего газа за счёт подмешивания холодного газа быстро (по мере удаления от входа струи) охлаждается или, как говорят в химической промышленности, «закаливается» (по аналогии с закаливанием металлических изделий путем резкого охлаждения). Поэтому передача тепла из горячей струи в холодное окружающее пространство представляется очень эффективной (по крайней мере, по сравнению со случаем, когда горячий газ тёк бы без подсосов в герметичной трубе), что и используется в тепловых завесах и тепловых пушках.

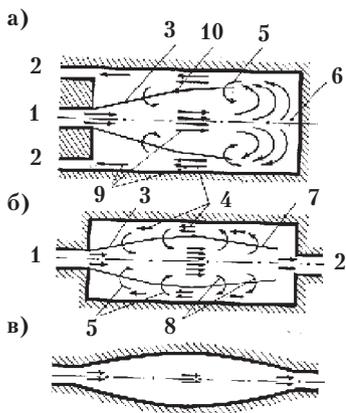


Рис. 133. Движение газов в полостях: а – стеснённая тупиковая затопленная турбулентная струя, б – стеснённая транзитная затопленная турбулентная струя, в – бестурбулентное расширение и сужение канала с ламинарным течением (трубка тока Бернулли, рис. 43). 1 – вход (исток) струи, 2 – выход (сток) струи, 3 – граница расширяющейся струи, разделяющая ламинарный газ и турбулентный газ в струе, 4 – встречный газовый поток, 5 – подсосываемый (подмешивающийся, эжектируемый) газ, 6 – тупиковая застойная зона, 7 – граница сужающейся струи, 8 – удаляемый из струи газ, 9 – число стрелок показывает величину расхода газа в струе, 10 – начало стеснённого расширения струи.

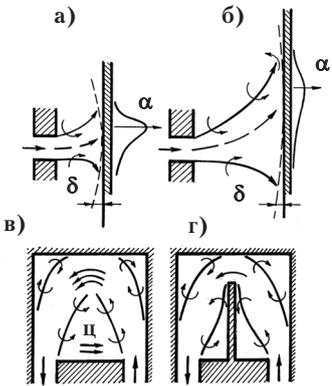


Рис. 134. Горячая струя в холодном газе, набегающая с подъемом на стенку. Мелкие стрелки – эжектируемый газ. α – коэффициент теплопередачи, δ – толщина ламинарного пограничного слоя, ψ – циркулярный поток (обратный).

Тем не менее, при истечении струй в полости такая теплопередача (из горячей струи «в пространство») не является теплопередачей в стенки полости («в печь»). Ведь тепло передается пока только из горячего газа в холодный, то есть тепло как бы «размазывается» по значительно большему количеству газа. В результате из малого количества горячих газов получается большое количество теплых газов, снять тепло с которых весьма затруднительно из-за малой (уменьшенной) разницы температур газов и стенок полости. Поэтому в теплотехнике всегда предпочитают работать только с горячими газами, а теплые (недостаточно горячие) газы порой экономически выгодней попросту сбрасывать в атмосферу (как это делают на теплоэлектростанциях). Во всяком случае в тепловых аппаратах стараются не разбавлять горячие газы холодными.

Чтобы все же отобрать тепло от не очень горячих (теплых) газов необходимо использовать следующие известные приемы: использовать большие площади теплосъема, обеспечивать высокие линейные скорости набега и создавать турбулентные режимы обтекания. Ясно, однако, что в полостях линейные скорости газов низкие (ниже, чем в каналах), а обычная инерционная турбулентность, как мы выяснили, в полостях подавляется (как в глушителе автомобиля). Так что остаются лишь возможности использования больших теплопоглощающих площадей и энергичного набега самой турбулентной струи (до ее полного распада, то есть в режиме дальнобойности) на стенки полости.

Объем полости растет как куб характерного размера полости, а поверхность полости растет как квадрат характерного размера полости. Поэтому, с увеличением размера полости температура струи снижается (из-за смешения с большим количеством газов в полости) быстрее, чем растет площадь теплосъема. Это значит, что газ не успевает охладиться в полости и начинает выходить из нее с более высокой температурой. Действительно, такая картина реально наблюдается, когда стенки полостей (каналов) поддерживаются при фиксированной температуре. Получается так, что газ в крупной проточной полости может

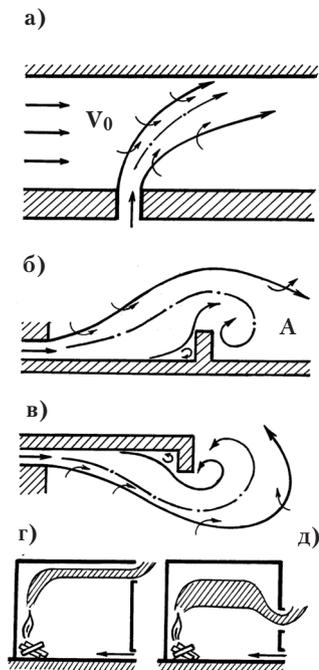


Рис. 135. Струя в сдуваемом потоке (а); плоская стелющаяся холодная струя в горячем газе, набегающая на выступ (б); горячая струя в холодном газе, стелющаяся по потолку и сталкивающаяся с выступом (в); выпуск дыма из курной бани в более низкое отверстие в стене приводит к более равномерному прогреву помещения, но за счёт худшего прогрева потолка.

охлаждаться хуже, чем в маленькой, что весьма необычно. Кажущееся противоречие снимается тем умозрительным соображением, что газ в трубе (канале) течет в тесном контакте с теплоъемными стенками, а газ в полости (той же длины, но расширенной по сравнению с трубой) течет струей по оси в «теплоизоляции воздушным зазором» - в окружении газов полости, которые плохо передают через себя тепло в теплоъемные стенки. Поэтому на практике полости всегда (когда

допустимо повышение газодинамического сопротивления) преобразуют в системы каналов (того же объема, но с повышенным теплоъемом). Если же температуры стенок не фиксированы, а постепенно разогреваются, то полость может оказаться более эффективной, чем труба той же длины (но только за счет лучшей внешней теплоотдачи), но система труб того же объема сохранит свои теплопередающие преимущества перед полостью всегда. Так, глядя на обычную кирпичную отопительную печь, сразу осознаешь, что пустая «коробка» печи («скорлупа») хуже уловит тепло дымовых газов, чем та же «коробка», сплошь пронизанная внутри дымовыми каналами.

Тем не менее, полости в печах бывают просто необходимы, например, как демпферы перед системой параллельных каналов. При этом ситуация в полостях может изменяться в зависимости от дальнобойности струй, то есть по-существу в зависимости от плавности перехода канала в полость.

Если затопленная струя развивается в ограниченном пространстве, то её называют стеснённой. Видов стеснённых струй множество, мы рассмотрим лишь простейшие случаи. Если вход (исток) и выход (сток) газа происходит из одной и той же стенки замкнутого сосуда, то такую струю

называют тупиковой (рис. 133а). Ясно, что в истинных колпаках мы всегда имеем только тупиковые струи той или иной геометрии. Если вход и выход газа организованы в противоположных стенках сосуда, то такую струю называют транзитной (рис. 133б). В канальных печах мы имеем преимущественно транзитные струи. В самом общем случае, входы и выходы газа могут находиться в любых стенках, такие струи называют транзитно-тупиковыми. В печном жаргоне иногда тупиковую схему рис. 133а называют колпаковой, а транзитную схему рис. 133б – прямоточной (сквозной). Прямоточные схемы являются полностью проточными (полностью вентилируемыми). Колпаковые (тупиковые) схемы бывают и проточными (вентилируемыми) при малой глубине тупика, и частично проточными при большой глубине тупика.

Стеснённые струи могут быть и набегающими (рис. 134а, б), сталкивающимися со стенкой, но свободными в направлении вверх вдоль стенки. Набегающие струи обеспечивают локальный нагрев (например, при сварке), причём в пятне контакта достигается не просто максимальная температура, но и максимальный коэффициент теплопередачи α ввиду малости толщины пограничного слоя δ , который попросту «сдувается». Струи в низком колпаке являются промежуточным случаем между тупиковой и набегающей (рис. 134в). Струя в перевале соединяет две транзитные струи (рис. 134г). Струи также бывают не просто всплывающими (рис. 134) за счёт своей «лёгкости» из-за высокой температуры, но и сносимыми газовым потоком (рис. 135а).

Особый класс струй, интересный в низких колпаках, составляют плоские струи в полуограниченном пространстве (рис. 130ж), сталкивающиеся с бортиком (выступом, плотиной) с образованием турбулентных барьеров (рис. 135б и в). Ясно, что эти струи даже в случае очень малых скоростей в режиме ламинарности далеки от идеальных течений Бернулли (рис. 133в).

Тупиковая турбулентная струя в замкнутой полости (сосуде, ёмкости) развивается следующим образом (рис. 133а). Сначала ламинарный поток 1 расширяется самым обычным турбулентным образом с захватом внешнего газа (рис. 132 и 49) до заполнения 22–25% площади поперечного сечения ограничивающей полости. Затем струя уже начинает чувствовать стеснение 10, и угол её расширения постепенно уменьшается (рис. 133а). После того, как сечение струи составит 42–45% площади поперечного сечения струи, подтекание (захват) окружающего газа в струю становится практически невозможным из-за, как иногда говорят, «увеличенного сопротивления». Имеется в виду, что линейная скорость газов в струе сравнивается с линейной скоростью встречных внешних (возвращающихся из тупика) газов 4, так что газы струи уже не в состоянии ув-

лечь за собой подтекающие встречные массы внешнего газа. А если говорить точнее, то направленный турбулентный поток в струе попросту перемешивается с противоположно направленным турбулентным потоком газов 4 и превращается в некую единую стоячую турбулентную зону 6 (застойную). Иными словами, струя (или полость) «запирается». При этом, если увеличить длину полости (вплоть до бесконечности), то картина рассматриваемого нами начального участка практически не изменится (в изотермическом случае равенства температур струи и полости). Это значит, что можно говорить о дальнობойности струи в конкретной полости: вся струя до разрушения характеризуется некой «длиной». Если длина струи больше длины полости, то такая полость считается проточной. Аналогичная картина наблюдается и при падении струи (из шланга) на поверхность бассейна: струя воды, попадая в воду бассейна, уходит вглубь лишь на конечную глубину, и возмущения на поверхности могут достичь, а могут и не достичь дна водоёма.

Струя в тупиковой полости (рис. 133а) «затапливается» не в неких абстрактных «газах полости», а во вполне определённых газах, тех, что раньше вошли в тупик. Других газов в тупиковых полостях просто нет. Струя фактически развивается во встречном потоке возвращающихся газов. Газ входящей струи турбулентно захватывает газ той же самой струи, но уже побывавшей в застойной зоне. Поэтому мы имеем дело, по существу, с неким смесительным аппаратом, смешивающим газы из разных (пространственных и временных) участков струи. Любая полость является смесительной, причём, чем полость крупнее, тем больше проявляется это смешение.

Транзитная турбулентная струя в замкнутой полости (сосуде, ёмкости) развивается во многом аналогично тупиковой струе (рис. 133б). Этот неожиданный результат получается из-за того, что струя обычно захватывает в единицу времени большие массы газа из полости (много больше, чем вводятся самой струёй в единицу времени в полость), но выйти через патрубок 2 может только то количество газа, которое вошло через патрубок 1. А это значит, что захватываемые струёй массы газа должны постоянно возвращаться к истоку струи, создавая тем самым тот же встречный поток 4 (ветер), который характерен и для тупиковых струй. Если полость очень длинная и имеет вид трубы, то застойная зона 7 превращается в протяжённую турбулентную область (с медленным поступательным движением), постепенно переходящую в ламинарный поток. В этом проявляется структура расширяющегося перехода, создающего местное газодинамическое сопротивление. Как и в случае тупиковых струй, транзитная струя при входе охлаждается подсосываемыми (эжектируемыми) объёмами газа полости. При этом резко снижа-

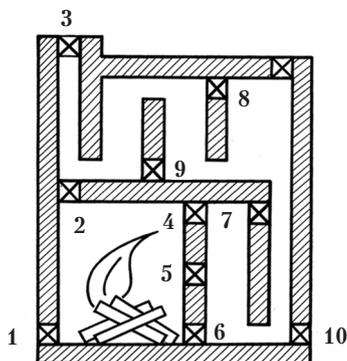


Рис. 136. Макетная схема печи с задвижками (пронумерованными цифрами), меняющими режимы работы полостей и каналов.

ется лучистый теплообмен, существенный при высоких температурах, особенно при задымлениях газа. Но если полость, газы в ней и газы струи имеют одну и ту же температуру, то никаких охлаждений, естественно, происходить не может.

В набегающих и обтекающих струях (рис. 134 и 135) также наблюдается подсос внешних газов в начальные участки струи с соот-

ветствующей закалкой струй и даже с уменьшением теплоотдачи (рис. 134а и 134б). Соответственно, в турбулентных колпаках (в отличие от ламинарных) всегда присутствует циркуляционный поток Ц, создающий смешительную крутку. Становится ясным, что противоточная схема на рис. 134г обеспечивает более высокий теплосъём с потока газа, чем колпаковая схема на рис. 134в, но за счёт перегрева перекрытия (см. раздел 5.7.11). Но колпаковая схема обеспечивает более высокую однородность температур в полости, но эти температуры будут сниженными по сравнению с прямоточной схемой (рис. 135г, д). В стелющихся струях (рис. 135б, в) обтекаемая поверхность не даёт подмешиваться в струю каким-либо газам с её стороны, обеспечивая повышенный теплосъём. Но есть неожиданности. Так, уступ на рис. 135б увеличивает теплоотдачу до уступа, поскольку не даёт вихрю А залезть под всплывающую струю. А на рис. 135в уступ (колпак) снижает теплоотдачу из-за образования перед уступом застойной зоны.

Прямоточная и колпаковая схемы (рис. 135г,д) удачно иллюстрируются «водовой моделью» на примере широко известной черной (курной) бани (избы). Если открыто выпускное отверстие (дымник) наверху у потолка (рис.135г), то дым стелется по потолку и нагревает только его. Если же выпускное отверстие опущено (рис.135д), то теплый дым накапливается под потолком, вследствие чего прогретой оказывается вся верхняя часть помещения до выпускного отверстия. Механизм прогрева помещения в последнем случае (в режиме колпака) отличается тем, что горячий дым уже не может всплывать к потолку в горячей припотолочной зоне из-за исчезновения подъемной силы и течет по слою горячего газа в выпускное отверстие. При этом температура

потолка бани уменьшается (по сравнению с прямоточной схемой), что снижает пожарную опасность. Кроме того, верх помещения заполняется дымом, не поддерживающим горение искр от открытого огня (далее на рис.143).

Особой спецификой обладают «плоские» (высокие и широкие, но узкие) полости в виде вертикальных или горизонтальных «щелей». Не являясь ни чисто объёмными, ни чисто канальными системами, такие полости с зазором 0,05–0,1 м (четверть или полкирпича) между стенками обладают хорошей, но очень неоднородной теплоёмочной способностью. Газодинамические характеристики таких щелей сильно зависят от геометрии ввода и вывода газов (поперёк или вдоль щели, вверх или вниз), поэтому такие «щели» в печах встречаются лишь с рассечками, переводящими полость в многооборотный дымоход плоской формы, обычно называемой отопительным щитом.

В заключение отметим, что экспериментальные исследования явлений в полостях печей сложны - до сих пор не выработана даже общепринятая методика таких исследований. Поэтому исследования физических явлений зачастую подменяются техническими испытаниями конкретных конструкций печей (например, по ГОСТ 3000-45). В результате, как остроумно и точно подметил американский конструктор А. Чернов, зачастую главным выводом трудоёмких экспериментов является заключение о том, что нужны дополнительные эксперименты (www.stovemaster.com). Во многом это объясняется тем, что разные газодинамические режимы испытываются в разных конструкциях печей, вследствие чего невозможно получить сопоставимые данные (www.woodheat.org; www.heatkit.com; www.kamicenter.ru и др.). Так что трудности таятся не в сложности техники эксперимента (в частности, в трудности замеров значений скоростей газовых потоков или перепадов давлений на уровне 1 мм водяного столба и менее), а в методике (идеологии) исследований.

Исследования должны мыслиться именно как проверка какой-либо модели явления (гипотезы), например, какой-нибудь закономерности течений газов полостях. Такие исследования (как выявление принципов конструирования) не могут быть выполнены, как правило, на обычных конкретных бытовых печах и требуют специальных (хотя бы простейших) «стендов», обеспечивающих постоянство хоть одного какого-нибудь параметра. Так, даже при использовании некой «универсальной» схемы печи (рис. 136), способной легко и мгновенно переходить из колпаковой конструкции в канальную (противоточную, многооборотную) путём простого переключения задвижек, становится ясным, что закрывающая и открывающая задвижки, мы одновременно меняем скорости сквозного

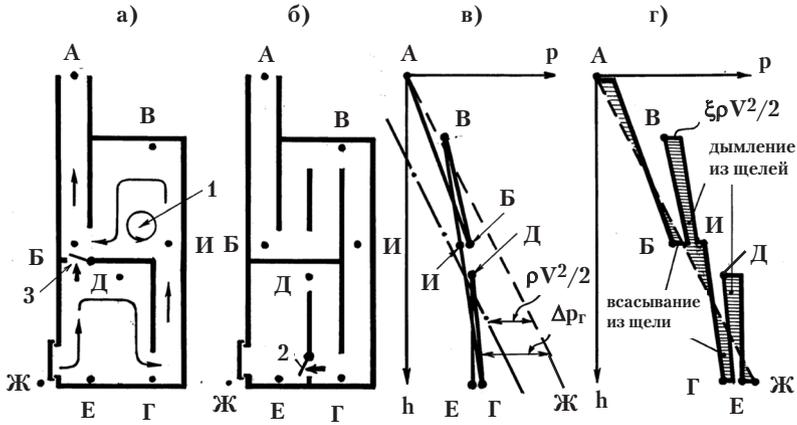


Рис. 137. Распределение статического давления в печи: а – схема колпаковой печи, б – схема канальной печи, в – график статического давления по высоте, в неподвижных газах. г – то же в подвижных дымовых газах. Точки на схеме и графике идентифицированы большими буквами. Сплошная ломаная линия на графике – распределение давления в печи. Штрих-пунктирная прямая соответствует пунктирной прямой, сдвинутой на величину давления торможения.

потока газов через печь и режим работы даже тех узлов, которые, казалось бы, никак не связаны с этими задвижками.

5.7.10. Давление в колпаках

Печная конвективная система (как последовательность полостей и каналов) по крайней мере в двух точках соединена с внешним пространством. В этой системе мы можем «нарисовать» два типа замкнутых кривых траекторий движения газов. Первый тип – это сквозные траектории, проходящие по внутренностям печи, выходящие наружу и затем вновь входящие в печь. Это вентиляционные траектории, замыкающиеся вне печи. Второй тип – это циркуляционные траектории, располагающиеся только внутри печи и замыкающиеся внутри печей. Это циркуляционные траектории, не выходящие наружу.

Вентиляционные траектории обусловлены наличием тяги дымовой трубы, так что являются траекториями «вынужденного движения газов» (а при наличии механических вентиляторов – траекториями «принудительного движения газов»). Циркуляционные траектории – это траектории «свободного движения газов» в том смысле, что они не определяются дымовой трубой. Общая газодинамическая обстановка в печи

оценивается суммированием скоростей движения по всем возможным траекториям: сквозным и циркуляционным.

Газы могут двигаться только по (тем или иным) замкнутым траекториям, а для этого необходимо, чтобы на этих замкнутых траекториях существовали перепады статического давления Δp (называемые тягой), расходуемые на гидродинамические (турбулентные) и вязкостные сопротивления. Те замкнутые траектории, на которых (при обходе всего контура) суммарный перепад давления отличен от нуля, могут реализовываться в природе. Наиболее простой и наглядный анализ осуществляется разбиением замкнутой траектории на два колена и определением весов этих колен. Если вес одного колена больше веса другого, то возникает замкнутый поток газа (вентиляционная или циркуляционная траектория). Вес колен может оцениваться в терминах статических давлений $\Delta p = \rho g H$ (см. раздел 4.1.4): если на одном высотном уровне (горизонте) в газе появляется разница давлений (тяга), то может появиться и горизонтальный поток газов (ветер). Поэтому информация о распределении давлений в печи может сказать о многом.

Рассмотрим печь упрощённо как систему коммуникаций с постоянно снижающимися температурами по дымовому каналу. Посмотрим графики статических давлений вдоль тракта печи (сплошная ломанная линия) и снаружи печи (пунктирная прямая) по стандартной методике (рис. 101, 112), но с учётом того, что температура в каждом канале печи (прямом участке) одинакова, но меньше по величине, чем температура в предыдущем (по потоку) канале (рис. 137в). Это значит, что наклон отрезков прямых, соединяющих точки с идентификационными буквами, по мере подъёма вверх по потоку увеличивается, то есть отрезок БВ круче, чем отрезок АБ. Как и прежде, построение графиков ведётся сверху из точки А, где статическое давление в печи (а именно в оголовке печи) равно статическому давлению в атмосфере на том же высотном уровне. Сначала находим статическое давление в точке Б как сумму статического давления в точке А плюс вес столба газа АБ исходя из плотности дымовых газов в нём (чем ниже температура, тем выше плотность дымовых газов). Затем находим статическое давление в точке В как разность статического давления в точке Б минус вес столба газа БВ и т. д. Полученная ломаная линия АБВГДЕ при равенстве температур (всюду во всех коммуникациях печи) спрямляется, сливается и превращается в единую прямую АЕ. Если же температура меняется не только в местах поворотов (разворотов) потоков, пронумерованных буквами, а снижается и в пределах каждого канала постепенно по тракту движения дымовых газов, то отрезки прямых между буквами (рис. 137в) превращаются в кривые (без изменения качественных закономерностей).

График на рисунке 137в относится к случаю закрытой дверки топливника (зольника), открытой трубы и отсутствию (или слабости) потока дымовых газов в печи. Этот график относится одновременно к обоим схемам печей (рис. 137а и 137б). Обращает на себя внимание возможность возникновения высокого статического давления в точке В (вверху верхнего колпака или у перевала многооборотной печи), выходящего за пределы пунктирной прямой и указывающего на возможность дымлений печи в этих зонах через щели и трещины кладки или сварки, через дверки или задвижки. Интересен также факт превышения давления в точке Б над давлением в точке И, что указывает на образование циркуляционного потока 1 (в схеме 137б он невозможен). Аналогично, давление в точке Г превышает давление в точке Е, что указывает на возникновение циркуляции (обратного тока) и в нижней части (ярусе) печи при наличии дверки 2 (или отверстия, или щели – «сухого шва»). Видно, что через «сухой шов» дым при малых расходах двигается циркуляционно (возвращается в топливник), не давая холодным (балластным) газам из топливника пройти в трубу. И наконец, остаётся открытым вопрос о соотношении давлений в точках Б и Д: дело в том, что обычный поток дыма через задвижку летнего хода 3 (растопки) вверх может в определённых условиях повернуть вниз. Отметим, что анализ представленных зависимостей статических давлений p от высоты h может осуществляться только сопоставлением давлений на одном и том же высотном уровне h . Но здесь мы хоть и сопоставляем точки Б и Д, относящиеся к разным ярусам печи, но учитываем, что эти точки отвечают одному высотному уровню.

Факт появления движения дымовых газов в печи (со скоростью V) приводит к снижению силы тяги на величину $\rho V^2/2$ (которая, строго говоря, в различных зонах печи различна), то есть сдвигает сплошную ломаную линию вправо или (как это сделано для графической простоты на рисунке 137в) сдвигает пунктирную линию влево (до положения штрихпунктирной прямой) на величину $\rho V^2/2$. Видно, что при повышении скорости дымового потока дымление из щелей возникает сначала во всём верхнем ярусе, а затем и у свода нижнего колпака в точке Д.

Если же дополнительно учесть наличие местных газодинамических сопротивлений для движений газов (по методу рис. 114), то получаем график на рисунке 137г. Видно, что в этом динамическом режиме статическое давление в точке Б заметно меньше, чем статическое давление в точке Д, что обеспечивает работу задвижки 3. Соотношения давлений в точках Б и И, а также в Е и Г показывают, что возникновение движения дымовых газов в печной системе при наличии местных газодинамических сопротивлений прекращает циркуляционные движения газов в колпаках обоих ярусов. Колпаки по-существу превращаются в проточные

полости со входным и выходным каналами. Это существенный результат: если при совсем малых расходах газов через печь в полостях (колпаках) преобладают циркуляционные процессы, то при увеличенных расходах газов через печь в полостях (колпаках) преобладают проточные процессы с подавлением циркуляций.

На рисунке 137г каждая полость формально описывается двумя высотными участками, формирующими тягу полости, и горизонтальным участком, формирующим газодинамическое сопротивление полости (колпака). При снижении расхода газа горизонтальные участки графика на рисунке 137г сокращаются, и рисунок 137г преобразуется в рисунок 137в. Видно, что по самому факту появления дымления из щелей можно в определённой мере судить о газодинамических свойствах печи.

Создание в печах всевозможных полостей бывает очень заманчивым для печников-практиков. Действительно, чем обдумывать оптимальный вариант прокладки каналов, проще, не задумываясь, направить дымовые газы в некий колпак, наивно полагая, что колпак сам по себе по своей внутренней природе «автоматически» охладит дымовые газы, причём при отсутствии гидравлических потерь (сопротивлений). К сожалению, газодинамические сопротивления существуют всегда, даже при внутренних свободно конвективных течениях внутри изолированных полостей (колпаков). Стоит только появиться потоку газа, тут же появляется сопротивление потоку (и вдоль сквозной вентиляционной траектории через полость, и вдоль внутренней циркуляционной траектории внутри полости). Поскольку сопротивление трения обычно мало, величину реального сопротивления можно визуальным образом оценить по интенсивности турбулизации потоков в печи: чем больше вы видите вихрей, тем больше газодинамическое сопротивление. При этом турбулентности возникают, по крайней мере, в трёх случаях: при больших скоростях в канале, при наличии поворотов и разворотов в каналах, а также при турбулизациях струй при сужении и расширении каналов (при истечениях из каналов в полости).

Особо остановимся на возможности накопления в колпаках токсичных и взрывоопасных газов (продуктов пиролиза древесины). Так, например, если на этапе интенсивного горения дров закрыть воздухоподающее отверстие, то раскалённый топливник продолжает нагревать дрова, а выделяющиеся при этом продукты пиролиза заполняют весь объём печи (вне зависимости от того, имеет ли печь полости, колпаки или только каналы), а при низких температурах дополнительно и пропитывают кладку.

Каналы сушатся и вентилируются легко, в каналах затруднено воспламенение горючих смесей за счёт повышенного теплоотвода в стенки,

каналы механически прочней полостей ввиду малых поперечных размеров. А вот полость, особенно тупиковая, заполненная смесью горючего газа с воздухом и имеющая стенки большой площади, может сыграть роль своеобразной «бомбы». При горении стехиометрических смесей температура продуктов сгорания может теоретически достигнуть 2000°С (с повышением давления в замкнутом сосуде до 8 атм). При объёмах, например, 400 литров, произведение объёма на давление может, в принципе, достигнуть 3200. Хотя на печи не распространяются требования «Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» (ПБ 03-576-03), тем не менее целесообразно предусматривать определённые предосторожности (не прикрывать верхнюю вьюшку, делать постоянные открытые продухи из верха колпаков в трубы, закладывать прочистные отверстия легковыбрасываемыми заделками и т. п.). Так или иначе, при работе с любыми печами (особенно с герметичными дверками) известны случаи глухих хлопков внутри с выбросами дыма и пламени из топливника.

В связи с этим, напомним, что возможность накопления взрывоопасных газов в крупных полостях печей порождает сомнения в правомерности перевода колпаковых печей на горелки с природным магистральным газом-метаном, поскольку метан легче воздуха, а баллонный газ-пропан тяжелее воздуха (см. Ю.П. Соснин, Е.Н. Бухаркин, *Отопление и горячее водоснабжение индивидуального дома*, М.: Стройиздат, 1991 г., стр. 247). Тем не менее, колпаковые печи допущены к переводу на газовое топливо. Согласно «Правил производства работ, ремонта печей и дымовых каналов» (ВДПО, соглас. с МВД РСФСР, 1991) «к переводу на газовое топливо следует допускать отопительные и отопительно-варочные печи с движением продуктов сгорания по каналам, соединённым последовательно и имеющих не более пяти дымооборотов для отопительных печей и не более трёх для отопительно-варочных; с движением продуктов сгорания без каналов свободно внутри полостей; с движением продуктов сгорания по каналам, соединённым параллельно; с движением продуктов сгорания по комбинированной схеме каналов – параллельным, последовательным и без каналов... Не допускаются к переводу на газ печи с горизонтальным расположением каналов». Последний пункт представляется удивительным: ведь печи с горизонтальными дымооборотами являются по-существу прямоточными, не способными накапливать какие-либо взрывоопасные газы ввиду «сквозняка». Значит, имелись какие-то более веские (чем взрывоопасность) причины для их запрета. По-видимому, был принят во внимание тот факт, что горизонтальные дымообороты являются по-существу потолками, имеют наивысшую теплотёмную способность, а потому и очень сильно прогреваются (причём

неоднородно) и, расширяясь, растрескивают («рвут») печь изнутри. А проникновение газа в помещения всегда наиболее опасно. Действительно, наличие горячего «ядра» в печи и неоднородный нагрев оболочки всегда чреваты хрупкой разгерметизацией. Так, в указанных правилах топливник футеруют (защищают от разрушения) только при периодической (а значит и интенсивной) топке газом, а при непрерывной топке (то есть подавая газ круглосуточно по чуть-чуть) футеровка не требуется.

5.7.11. Топочные процессы

Мы опять возвращаемся к процессам горения и вновь вспоминаем, что сама печь (и её конструкция) не совсем то, что процессы горения в ней. Дрова жгут люди, и при этом дрова не знают, где горят: в бане или в топке паровоза. А вот многим дачникам (и даже печникам) кажется, что вовсе не они лично, а именно сами печи как-то определяют, как гореть дровам. Слишком у многих живёт нехитрое размышление, что «дрова пусть горят в топливнике», и знать о них больше нет необходимости.

Но что значит «пусть горят»? Ведь печь является лишь аппаратом (инструментом) в руках человека, таким же, фактически, как кастрюля в руках повара. Как топишь, так печь и горит. Но бывает, конечно, что «кастрюля не подходит». Например, можно бесконечно ругать металлическую варочную плиту (которая «даёт так много сажи» и совсем «не держит тепла»), настоятельно рекомендуя дачнику заменить её на другую (например, на кирпичную печь-шведку), даже «не догадываясь», что эта металлическая плита предназначена именно и только для быстрого приготовления пищи, а не для обогрева помещения. Проснувшись утром, быстренько бросил в топку пару щепок, вскипятил чайку и помчался на работу. А если эту плиту топить крупными поленьями и сутками, то она и впрямь будет не совсем удачной (и не только из-за сажи). Такие уж они варочные плиты: имеют очень низкий топливник и лишь для того, чтобы получше нагреть варочную поверхность, пусть за счёт большого количества сажи. Так, например, в США все кухонные плиты на дровах вообще освобождены от проверок на задымлённость выбросов (поскольку все они неминуемо дымят). Так же в США все производители печей напоминают, что неквалифицированное обслуживание способно перечеркнуть все достоинства сертифицированных печей.

Не зная, как горят дрова, дачнику трудно правильно оценить качество печи, а печнику трудно правильно спроектировать топку. Но как раз технологические аспекты «правильного сжигания дров» всё больше забываются и дачниками, и печниками. Специально подчеркнём, что в России сейчас нет никаких объективных предпосылок для «дровяного прогресс-

са» и сколько-нибудь оживлённого интереса к процессам в топливниках дровяных печей. Ни на государственном (академическом и промышленно-отраслевом) уровне, ни среди бытовых печников нет желаний тратить силы и деньги на изучение дров и топливников. Наша страна еще в далекие послевоенные 1950-е годы решительно отказалась от дров как стратегического топлива для транспорта и отопления в пользу сначала угля, затем нефти, а потом электричества из газа и «атома». С 1976 года СССР полностью прекратил государственное техническое регулирование в области норм проектирования топок бытовых печей, отменил без замены ГОСТы 2127-47, 4057-48, 3000-45, 3013-45, 3016-45, 3012-52, 3014-52, 3017-52, 4690-49 и многие другие. Это было отражением того факта, что печное отопление (наряду с подковами для лошадей и венниками для бань, на которые в своё время тоже были ГОСТы) уже перестало быть актуальным на общегосударственном уровне, уступив своё место центральному котельному отоплению. Все предприятия и физические лица получили техническое право изучать, проектировать и устанавливать печи по своему разумению, но с соблюдением жёстких правил безопасности и норм проектирования дымовых труб по СНиП 41-03-2003, ГОСТ 9817-95 (в части печей с водяным контуром) и НПБ 252-98 (см. раздел 5.7.17).

Аналогичная ситуация сложилась не только с нормами проектирования самих печей, но и нормами проектирования печного отопления вообще (то есть не только с нагревательными аппаратами, но и со зданиями). Печное отопление перестало рекомендоваться, а стало только ограниченно допускаться (в зданиях до 2 этажей до 100 присутствующих людей). В 1986 году был отменён последний чрезвычайно «мягкий» и неконкретный пункт 4 Приложения 7 СНиП-33-75, предписывающий принимать при проектировании печного отопления печи, «конструкции которых испытаны в лабораториях, имеют теплотехнические характеристики и проверены в эксплуатации». В результате, с прекращением государственного финансирования крупная индустрия утратилась от прав на прогресс дровяного отопления.

Судьба дровяных печей в США была более «счастливой», поскольку забытые с 30-х годов (даже в сельской местности) дровяные печи вдруг оказались востребованными с 1973 года в связи с нефтяным эмбарго арабских стран. Дровяные печи «как пережиток и реликвия» неожиданно стали «американской декларацией энергетической независимости», поддерживаемой правительством даже материально. Всё это подтолкнуло к невиданному ранее размаху исследований дровяных печей и росту их производства. За один только 1980 год было продано населению 2,5 млн. дровяных печей. Да и сейчас из-за озабоченности населения

энергетической ситуацией и из-за высокой стоимости нефтяных топлив ежегодно продаётся около 130 тысяч печей. По данным Энергетического Департамента США более чем 20% американских домовладельцев (причём даже порой и в городах) пользуется дровами для полного или частичного теплоснабжения. При этом стратегическое значение имеют запасы возобновляемого древесного топлива, в том числе и отходы деревообрабатывающего производства, стимулировавшие производство гранулированной дроблёной древесины в виде пеллет (от англ. «pellet»-таблетка).

Распространение в США печного дровяного отопления потребовало проведения большого объема конструкторских и экологических исследований в части снижения дымления печей («эмиссии частиц» дымообразующих веществ, включая сажу, пепел, капли креозота - жидких продуктов пиролиза) в воздух помещений и в атмосферу населённых пунктов. С 1988 года дровяные печи и очаги в обязательном порядке сертифицируются в рамках EPA (US Environment protection agency – Американского правительственного агенства по защите окружающей среды) на эмиссию частиц: установлена норма дымления (выпуска в атмосферу) не более 7,5 г частиц аэрозоля в час в среднем за всё время горения печи и не более 18 г/час за любой промежуток времени, включая розжиг печи (содержание углерода не лимитируется). В результате двадцатилетних исследовательских работ реальный средний уровень дымления бытовых печей заводского изготовления был сокращён до 1–4 г/час и даже ниже. Большое значение приобрели (и уже давно стали обычными бытовыми) печи на пеллетах, имеющие в отличие от печей на поленьях (связках дров) очень низкий уровень дымления менее 1 г/час, а потому и не требующие обязательной сертификации.

Система сертификации дровяных печей вводится и в других странах на основе собственных стандартов. Так, австралийский стандарт AS4013, новозеландский NZ4013 и международный ISO13336 ограничивает дымление (содержание частиц аэрозоля) на уровне 4 г на 1 кг дров (1999 год). Эти стандарты методически сильно отличаются от американского стандарта EPA и близкого к нему канадского стандарта CSA-B 415. Норвежский стандарт ограничивает содержание аэрозоля на уровне 5–10 г/кг, английский стандарт BS7256 – 5,5 г/кг. Шведский стандарт SP1425 лимитирует аэрозоль на уровне 40 мг на 1 МДж выделенной в топке энергии, а австралийский стандарт EN303-5 на уровне 60 мг/МДж. Европейский стандарт CEN13240 лимитирует содержание окиси углерода 0,3% и содержание аэрозоля в дымовых газах на уровне 150 мг на 1 м³ выброса из дымовой трубы при санитарной предельно допустимой концентрации (ПДК) сажи в атмосферном воздухе населенных пунктов и жилых зон

0,15 мг/м³ (С.И. Муравьёва и др., Справочник по контролю вредных веществ в воздухе, М.: Химия, 1988 г.), то есть требуется разбавление дымовых газов ветром в десять тысяч раз. Для ориентировки можно принять, что дымление 150 мг/м³ соответствует примерно 15 г/кг и 150 мг/МДж. Немецкие стандарты DIN18891 и DIN18895 ограничивают только выброс окиси углерода на уровне 0,4% (и продолжают ужесточать требования до 0,2% и ниже). Россия подобных стандартов для бытовых печей не имеет. Тем не менее, экологические службы требуют согласования всех проектов в части выбросов в атмосферу (с расчётом по ОНД-86 на предмет непревышения разрешённых уровней загрязнения атмосферного воздуха в конкретном регионе). Государственный стандарт ГОСТ 9817-95 «Аппараты бытовые, работающие на твёрдом топливе» (распространяющийся только на аппараты с водяным контуром, но за неимением иного использующийся и при анализе печей) ограничивает содержание окиси (оксида) углерода в «сухих неразбавленных продуктах сгорания» на уровне 4,0% об. при работе на буром угле или дровах при выполнении общих требований СанПиН 4946-89 «Санитарные правила по охране атмосферы воздуха» (ныне СанПиН 2.1.6.1032-01 «Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест»).

Всё это означает, что разработки в области дровяного печного отопления могут иметь неожиданные продолжения. В России, где более трети сельских домов до сих пор отапливаются печами, отношение к дровам очень неоднозначное. Те, кто имеет дровяные печи, стремятся поставить в них водяной контур центрального отопления и при малейшей возможности переходят на уголь и на котлы заводского изготовления, а в мечтах и на газ или электричество. В крупных же городах вообще не мыслят цивилизованную жизнь «на дровах». Вновь возводимые коттеджные постройки в обязательном порядке базируются на автономном центральном отоплении, а печи (очаги, камины) в них воспринимаются как декоративный элемент интерьера (впрочем и во многих банях тоже). Наиболее востребованы печи (и кирпичные, и металлические) на садовых и дачных участках, однако ввиду сезонности проживания вопросы экологии и экономичности эксплуатации не находят никакого интереса – важна лишь стоимость постройки. Прослойка населения, наиболее восприимчивая к прогрессу дровяного отопления (состоящая в высокоразвитых странах из горожан, живущих в собственных домах), в России не так многочисленна и в основной своей массе бедна.

Поэтому в настоящее время востребованы в основном три категории печей (именно печей, а не теплогенераторов вообще, в том числе банных). Во-первых, большие дорогостоящие кирпичные (с декоративной

отделкой) интерьерные печи (зачастую с покупной чугунной топкой-сердцевиной), преимущественно полостные (противоточные и колпаковые), а потому и крупногабаритные. Во-вторых, очень надёжные, а потому очень простые и в эксплуатации, относительно дешёвые кирпичные печи для постоянного сельского проживания. В-третьих, компактные и очень дешёвые (в том числе и при установке) печи для периодического (сезонного) и эпизодического проживания (в том числе и на дачах). Каждый читатель волен самостоятельно определять необходимые потребительские и технические требования к каждой перечисленной категории печей, поскольку ни государственные нормативные документы, ни специальная литература никаких рекомендаций и ограничений на этот счёт не содержат. Ясно, однако, что в интерьерных печах главное – красота, в бытовых – надёжность (консерватизм), в садовых и дачных – дешевизна. Похоже, что и иностранцы разделяют эту точку зрения. Так, французский стандарт NFD35376 классифицирует печи (очаги, камины) с точки зрения потребителя на три категории. Категория А – это декоративное оборудование, для которого не предусмотрены требования, касающиеся сохранения жара. Категория I – это оборудование, удерживающее жар меньше 10 часов (это металлические печи-воздухонагреватели). Категория С – это оборудование, удерживающее жар минимум 10 часов (теплоёмкие аппараты, в том числе кирпичные печи).

Наиболее сложным элементом дачных печей (в плане анализа и оптимизации) является топливник, насыщенный всевозможными физико-химическими процессами. Так, например, изменяя лишь приёмы сжигания дров (технология), можно зачастую изменить ситуацию в топливнике.

Топливником (топкой, камерой сгорания) называют полость печи, куда закладываются дрова (поленья) и где они затем сжигаются. Топливники бывают разными: кирпичными и металлическими, холодными и раскалёнными, высокими и низкими, широкими и узкими, с газопроницаемым (решетчатым) дном и газонепроницаемым (сплошным, подовым), с герметичными стенками и дверками (air-tight) или недостаточно герметичными (обычными), с нижним отводом дыма (продуктов сгорания) или с верхним и т. п. Топливник порой может иметь вид некоего канала (узкой проточной полости), выходящего в другую (более широкую) полость – но всё равно, процессы в нем будут пространственно разделёнными и многочисленными.

Столь широкое (и можно даже сказать, весьма произвольное) многообразие конструкций топливников возможно по одной единственной и очень важной причине: дрова в топливнике горят фактически не в топливнике, а в костре, то есть горение поленьев происходит по сути в промежутках (в зазорах) между самими поленьями. Одни поленья, уже раз-

горевшись, греют, высушивают, пиролизуют, воспламеняют и помогают гореть другим поленьям. То есть поленья горят внутри топливника не каждое индивидуально само по себе, соотносясь с топливником, а именно коллективно, порой вообще не соотносясь с топливником (например, при розжиге). Основные процессы горения дров в топливнике происходят внутри самой закладки дров в значительной степени автономно, а окружающий дрова топливник является лишь неким удерживающим ограждением и некой «окружающей средой», может быть, способствующей, а может быть, и затрудняющей горение, но вовсе не определяющей. И только когда человек (специально или по недомыслию) допускает вывод горючих газов пиролиза из закладки дров, только тогда топливник может играть существенную роль в процессах горения.

Всё это подталкивает на мысль, что топливник может с самого начала мыслиться многофункционально: какая-то часть может задумываться чисто ограждающей, какая-то часть подогревающей (воспламеняющей), какая-то часть охлаждающей (теплосъёмной), какая-то часть дожигающей (дымоустраняющей), какая-то часть чисто декоративной и т. п. Это открывает новые возможности, но вместе с тем требует переосмысления процессов в топливнике, их расчленения и анализа по частям. Поэтому такая постановка вопроса может восприниматься и пониматься печниками по-разному в зависимости от конкретных знаний, предпочтений и взглядов (от «пусть останется как есть» и до «делай как хочешь»). Как-либо устоявшихся догм в России в этом вопросе пока не существует кроме самых житейских: для отопительных дровяных печей высоту топливника делают повыше 600–1000 мм (чтобы успевала сгорать сажа, то есть чтобы пламя не залезало в трубу), для отопительно-варочных и кухонных плит пониже 400–600 мм (чтобы хорошо прогрелся, пусть даже с выделением сажи, варочный настил: 5 рядов кирпича – для кипячения воды, 6 рядов – для жарки, 7 рядов – для варки), колосниковую решётку укладывают на 70–140 мм ниже топочной дверки (чтобы горящие угли не выпадали на пол), причём менее мощная печь требует более узкого топливника (чтобы слой поленьев был вначале не менее 200–300 мм для хорошего разгорания), чем более плотно уложены поленья, тем лучше они разгораются и меньше дымят и т. п.

В США сложились более жёсткие требования к топливникам. Так, в целях снижения дымления современные топливники снабжаются изолированным (герметичным) корпусом 1, большим «отражателем» 4 или 10 (для обеспечения длинного горячего «пути» для продуктов сгорания – дымовых газов) и подогревателем воздуха 7 или 9 (в первую очередь вторичного), подаваемого в топливник (рис. 138). Кроме того, ЕРА рекомендует глухой теплоёмкий и малотеплопроводный под 13 (но не

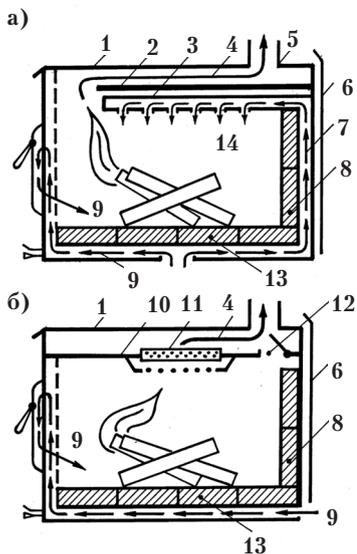


Рис. 138. Схемы малодымящих сертифицированных печей США (www.epa.gov): а – некаталитическая схема с уровнем дымления не более 7,5 г/час, б – каталитическая схема с уровнем дымления не более 4,1 г/час. 1 – корпус печи, 2 – отражатель, 3 – распределительная труба вторичного воздуха, 4 – выход дымовых газов, 5 – дымовая труба, 6 – экран от инфракрасного излучения, 7 – канал подогрева вторичного воздуха, 8 – огнеупорная футеровка, 9 – канал подогрева первичного воздуха, 10 – перегородка разделительная и отражательная, 11 – катализатор согочный, 12 – обходной (байпасный) канал с задвижкой (клапаном), 13 – огнеупорный сплошной под, 14 – распределительный ввод горячего вторичного воздуха на дожигание летучих.

решётку), теплоизолирующую футеровку 8, распределённый ввод вторичного воздуха 14, катализатор 11 и др. (рис. 138). Катализатор 11 представляет

собой крупноячеистую структуру (сотовую, дырчатую, решетчатую) с низким гидродинамическим сопротивлением, изготовлен из термостойкой керамики со специальными керамическими добавками, нагревается потоком газа, рассекает, перемешивает и дожигает остаточные количества газифицированного топлива. Каталитическое действие может мыслиться по-разному (но лучше комплексно). Можно дожигать газы (на окислах ванадия, марганца, железа, кобальта, никеля, молибдена и др.), окись углерода (на платине, палладии и родии) как в автодвигателях, саму сажу (окись меди). Катализатор работоспособен лишь при наличии избытка кислорода (не менее 13% в отходящих газах), поэтому печи с катализатором могут работать с большими избытками воздуха (в отличие от некаталитических печей). Отметим, что катализаторы в печах, сертифицируемых EPA, обладают именно химическими каталитическими свойствами и начинают работать при температурах 180–400°С. Катализаторы имеют ограниченный ресурс (до 6 лет при грамотной эксплуатации) и мыслятся как сменные элементы. Растопка печи ведётся при открытой обходной задвижке 12 для предотвращения «отравления» катализатора продуктами пиролиза. Применение в печи именно пода, а не решётки объясняется стремлением снизить высоту пламени и предотвратить вынос пепла дымовым потоком.

Для общности, приведём десять основополагающих правил проектирования систем печного деревянного отопления (именно систем

отопления, а не просто печей), разработанных Дровяной отопительной организацией США (The Wood Heat Organization, www.woodheat.org):

- дымоходы прокладывать только внутри здания так, чтобы они всегда были тёплыми (по крайней мере, как воздух в здании), даже если печь (камин) не работает;

- дымовую трубу выводить через самую высокую точку здания, чтобы тяга в дымовой трубе всегда была сильнее, чем тяга гравитационной вентиляции здания;

- дымовую трубу делать как можно выше, не допуская задува в неё ветра, но защищая её колпаком от дождя;

- дымовой канал от печи до оголовка трубы вести строго вверх без изгибов и ответвлений для уменьшения сопротивления дымовому потоку;

- дымовые каналы делать герметичными, теплоизолированными, с нужным проходным сечением, чтобы дымовой поток был повсюду горячим и быстрым;

- печь и вентсистема здания также должны быть хорошо (разумно) уплотняться (дверками, задвижками), не пропускать холодного воздуха через щели;

- печи и камины, сертифицированные ЕРА на малую эмиссию дыма, не должны допускать тления древесины, поскольку тление выделяет много дыма;

- если печь установлена в герметичном, но вентилируемом здании, то приточно-вытяжная вентиляция должна быть сбалансирована (поскольку превышение вытяжки над притоком может вызвать постоянное разрежение в здании и нарушить работу дымовой трубы);

- в помещении не должно быть мощной вытяжки (например, типа кухонной), но если она есть, то необходимо предусмотреть систему автоматического отключения электропитания при чрезмерном разрежении воздуха в помещении;

- печь должна эксплуатироваться информированным (опытным) пользователем, поскольку даже лучшие приборы могут быть выведены из строя неправильными действиями и недостатками ухода (текущего ремонта).

Эти нехитрые американские правила не содержат неожиданных моментов, но именно эти банальности при неукоснительном исполнении обеспечивают культуру печного отопления с точки зрения экологов. Помимо этих правил отмечаются чисто технические подробности, связанные с необходимостью быстрого появления сильной тяги при первичной растопке, предотвращения выхода дыма и запахов в помещение даже при отсутствии огня в топке, стимуляции течений газов в трубах неработающих печей вверх, а не вниз. В частности отмечается, что подача воздуха

в печную топку снаружи здания никак не снижает дымления печи по сравнению со случаем подачи воздуха строго из помещения (вопреки некоторым частным рекомендациям). Многие из этих правил давно уже учтены отечественными нормами (ныне СНиП41-01-2003), правилами ремонта печей и перевода их на газ. Вместе с тем в России всё усиливается коммерческая пропаганда (реклама) сильнодымящих в атмосферу герметичных печей медленного горения (тления) и колпаковых печей с избыточным давлением, способных загазовывать помещения.

Возвращаясь к топочному процессу, рассмотрим его поэтапно в соответствии со стадиями горения дров. Топочный процесс начинается с растопки печи, с самой хлопотной печной операции. Растопка печи имеет две задачи - воспламенить закладку дров и создать тягу в печи.

В начальный момент растопки, когда еще нет сформировавшегося костра (режима коллективного горения дров), индивидуально (в одиночку) могут загореться пламенем только «мелкие полешки», такие, как спички, лучины, бумага, щепка. Все знают, что только именно такие «мелкие полешки» могут использоваться в качестве растопки. Дело в том, что при увеличении «диаметра» полена тепловыделение от пламени растёт как площадь поверхности полена (то есть пропорционально «диаметру»), а затраты на разогрев древесины (до температуры воспламенения новых зон древесины) растёт как объём полена (то есть пропорционально квадрату «диаметра», а то и кубу). Поэтому, если и поджечь как-нибудь специально одиночное крупное полено (например, телеграфный столб снизу керосином), оно сможет обуглиться (и даже истлеть потом), но как спичка загореться пламенем и сгореть не сможет, потухнет. Потому-то в «Булерьянах» отдельные крупные плахи не горят, но тлеют хорошо. Чтобы сжечь в «Булерьяне» крупные поленья (именно в пламенном режиме), надо расположить поленья минимум парами или тройками.

Растопка же в виде одиночного «мелкого полешка» может гореть самостоятельно даже в холодном окружении и, сгорая, может нагреть поверхности окружающих крупных поленьев до температуры воспламенения древесины 320°C , что соответствует тепловому потоку на древесину 14 кВт/м^2 и температуре воспламеняющего излучателя 450°C (все эти численные данные здесь и далее ориентировочные). Воспламенившиеся крупные поленья уже могут гореть пламенем самостоятельно, но только коллективно в воздушных зазорах между собой (в «микротопках»), грея друг друга лучистыми потоками не менее 14 кВт/м^2 .

Если растапливаемая печь холодная, то первой задачей растопки становится организация тяги в трубе, поскольку для горения самой

растопки нужен постоянный подвод свежего воздуха. Так, если банная печь имеет крупную фильтрующую каменку на пути дымовых газов и не имеет обходного растопочного (летнего) дымохода, то такую печь зимой растопить порой вообще не удаётся исключительно по причине трудности создания первичной тяги: приходится создавать дополнительный искусственный топливник, сжигая бумагу (растопку) в каналах печи или на поверхности каменки. И всё равно при розжиге печи с фильтрующей каменкой зимой сначала на камни выпадает вода, затем воднокреотная смесь («конденсат») и сажа.

Все это означает, что необходимо организовать некую растопочную камеру 2 и растопочную линию 4 (рис. 139) для первичного разогрева трубы. Эти растопочные устройства могут мыслиться (размещаться, объединяться, отождествляться) и как часть самой печи (и что бывает чаще всего, как часть топливника), и как пристроенные, но совершенно автономные узлы, например, как камин или летняя отопительно-варочная печка (в составе комплексного печного агрегата), в том числе и узлы в металлическом исполнении. Сами по себе понятия растопочных узлов (камер, каналов, линий) мы рассматриваем здесь прежде всего как абстрактные (виртуальные) узлы, помогающие разобраться с сущностью процесса розжига печи. Так, некоторые холодные узлы печи (например, трубы) в целях быстрого бездымного пуска можно вначале прогреть газовой горелкой или электричеством, и только затем разжечь печь на дровах. На практике весь топливник может вначале выполнять роль растопочного, а потом уже роль отопительного устройства. Функцию растопочной камеры 2 могут выполнять и зазоры между поленьями 16.

В любом случае печь растапливается с помощью некоего растопочного устройства 15. Вначале потребляется кислород из растопочной камеры 2, и этого кислорода должно хватить на некоторое время, пока горячий дым, устремляясь из закладки вверх (и уступая место «свежему» воздуху), не достигнет дымовой трубы и, заполняя её, не создаст тягу и гравитационный поток свежего воздуха из зольника 17 (или через специальный вход 1). Если кислорода в растопочной камере не хватает, можно заимствовать кислород из всего топливника методом вентиляции через подпиточное отверстие 10 (или через некий «сухой шов» – сквозной разрез в стенках камеры 2). Если и этого кислорода не хватает, придётся для вентиляции открывать дверку топливника и через неё вводить свежий воздух к растопочной закладке и выводить дым в помещение (что, ясно, крайне нежелательно). Лучше всего при пуске печи создать первоначальную тягу с помощью механического вентилятора в дымовой трубе, но это в быту пока практически не применяется даже в дорогих каминах. В лю-

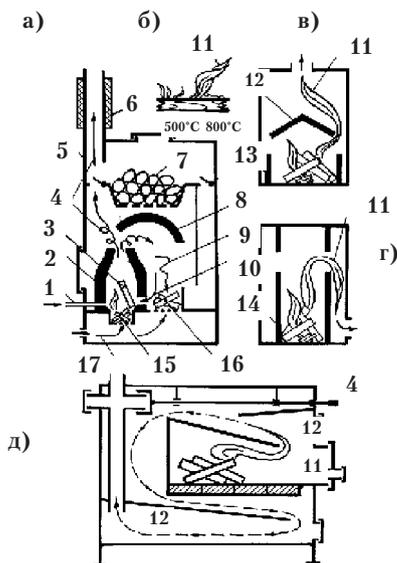


Рис. 139. Поясняющие модельные схемы топливников с макетными жаровыми камерами: а – принцип устройства бездымной печи, б – мелкие факелы при температуре жаровой камеры 500°C и крупные факелы при 800°C , в – схема с нижними экранами и верхним отражателем, г – схема с жаровым каналом (версия противотока), д – макет печи с топливником – жаровой камерой внутри оборотного теплосъёмного топливника, при малых избытках воздуха заполняемого языками пламени (отражатели направляют пламя так, чтобы оно омывало все тепловоспринимающие стенки). 1 – подача воздуха, 2 – первичная жаровая камера, 3 – модельное полено, нагревающееся растопочной закладкой, 4 – путь дымовых газов (растопочный канал с клапаном), 5 – дымовая труба, 6 – утепление трубы, 7 – каменка, 8 – вторичный экран-отражатель, 9 – излучение с экрана на закладку дров, 10 – вентиляционные для первичной растопки, 11 – мощный факел, образованный слиянием мелких факелов, 12 – навес-отражатель, 13 – нижние экраны (в зоне максимального действия излучения от углей), защищающие топливник от перегрева и нагревающие горящие дрова, 14 – высокие экраны (в том числе цилиндрические), 15 – первичная растопочная закладка лучины, 16 – основная закладка дров в поленях, 17 – поток воздуха из топливника.

бом случае растопочная линия 4 должна быть как можно короче, а дымовая труба должна быть теплоизолирована 6 для быстрого прогрета.

Продолжая такого рода банальные рассуждения вспоминаем, что горение растопочной закладки должно прогревать предварительно не только трубу, но и вышележащие лучины 3, а затем более крупные поленья основной массы закладки дров 16. Разогревающиеся дрова начинают выделять пары креозота (смесевые совокупности веществ - летучих продуктов пиролиза в виде испаренных горючих жидкостей), сгорающие самостоятельно или в пламени растопочной закладки. Но нагреваются при этом и те поверхности поленьев, которые не контактируют с огнём, и из них при $150\text{--}320^{\circ}\text{C}$ начинают выделяться пары креозота, не способные самостоятельно сгорать из-за своей низкой концентрации в воздухе. Если температура в растопочной камере низка, то эта часть паров креозота конденсируется с образованием тумана, так называемого «белого» дыма: при большой концентрации бурого или серого цвета. Воспламениться эти жидкие капельки тумана не могут принципиально, поскольку температура мелких частиц в газах всегда равна температуре газа (в отличие от

крупных капель, способных существенно нагреваться относительно газа). Для сгорания эти мельчайшие капельки тумана должны где-то испариться «до молекул» (превратиться в пар), а затем эти молекулы могут «сгореть» в воздухе (окислиться) тремя путями.

Во-первых, если температура древесины ниже 270⁰С, то концентрация паров креозота в воздухе над поленом будет ниже нижнего концентрационного предела воспламенения (НКПВ), и такая паровоздушная горючая смесь сможет сгореть лишь в пламени постороннего источника (сжигателя, дожигателя), а самостоятельно сгореть не сможет (если нет катализатора). Поэтому, если пламя растопочной закладки слабое (низкое) и не охватывает всё полено целиком, то пары креозота, истекающие с верхних сторон (и особенно торцов) поленьев, могут не попасть в пламя, конденсируются в холодных газах в топливнике в туман и уходят в трубу в виде белого дыма или, находясь в горячих дымовых газах, уходят в трубу в виде бесцветных пахучих невидимых глазом паров (которые в свою очередь могут затем вновь сконденсироваться где-то в холодной трубе или в холодной атмосфере в виде белого дыма).

Может быть и такой случай, когда пары креозота не могут воспламениться в трубе, но могут разлагаться в горячих газах трубы с образованием продуктов пиролиза (или продуктов окислительного пиролиза) с образованием сажи - черного дыма. Этот черный дым подмешивается в белый дым и окрашивает его в бурые цвета. Так что белый дым - это капельки креозота, возникшие при конденсации паров креозота. Черный дым - это частицы сажи, возникшие при пиролизе паров креозота. (Отличают и «сизый» дым - ультрадисперсные частицы сажи, возникающие при окислительном пиролизе паров креозота при развитом пламенном горении). Белый дым характерен для этапа разжигания холодной печи. Черный дым более характерен для этапов развитого пламенного горения печи, когда в условиях нехватки кислорода (или касаний пламени холодных стенок) реализуется пиролиз паров креозота. Именно поэтому в каминах и русских печах при растопке стараются расположить поленья «костром» - торцами вверх и рядом друг с другом, чтобы пары креозота с пористых торцов сразу попадали в пламя от растопки (или растопку располагают поверх закладки дров).

Во-вторых, если в результате более интенсивного нагрева поленьев образуются концентрации паров креозота выше НКПВ, то такие паровоздушные горючие смеси способны воспламениться (взрываться) от внешнего источника зажигания (даже кратковременного типа искры) и сгорать самостоятельно, или без доступа дополнительного воздуха (вспышкой) или во внешнем воздухе (голубым пламенем). НКПВ паров креозота около поверхности древесины (подсушенной пламенем до абсо-

лютно сухого состояния) достигается при температуре древесины 270–320°C (охлаждаемой испарением креозота). Такая температура поверхности достигается при нагреве её тепловым потоком порядка 14 кВт/м², что соответствует воздействию дымовых с температурой на уровне 700°C или излучению абсолютно чёрного тела (стенок печи, углей или раскалённых сажистых частиц в пламени с температурой на уровне 450°C). Здесь можно выделить два режима:

– когда креозот выделяется из полена медленно (температура древесины на уровне 270°C), и пламя, возникнув, доходит до полена и гухнет,

– когда креозот выделяется быстро (температура древесины на уровне 320°C) и пламя устойчиво горит прозрачно-голубым цветом как в бунзеновской горелке (см. раздел 5.6.4). Каждый может наблюдать в печи мелкие язычки голубого пламени, исходящие из трещин воспламеняющегося полена.

В-третьих, если разогрев поленьев очень силен (температура древесины выше 320°C), то образуются концентрации паров креозота выше верхнего концентрационного предела воспламенения (ВКПВ). Такие горючие смеси не могут гореть самостоятельно (не воспламеняются внутри себя) из-за низкого содержания в них кислорода. Но они могут гореть, реагируя с внешним воздухом в виде факелов, когда в оболочке, ограничивающей объём горючих газов, диффузно смешивается горючий газ изнутри и воздух извне, и происходит горение. Такое горение знакомо всем по длинным колышущимся «языкам» пламени в топке: внутри «языка» – горючий газ, вне «языка» – воздух. Объёмные концентрационные пределы воспламенения в воздухе (НКПВ - ВКПВ) составляют для водорода 4–74%, окиси углерода 12–74%, метана 5–15%, пропана 2,4–9,5%, бензола 1,4–6,7%, этилового спирта 3,3–19,0%, коксового газа (продукта пиролиза чёрного угля) 5,6–30,8%, доменного газа 35–74% и т. п.

Таким образом, при низких температурах стенок топливника «белое» пахучее дымление поленьев с внешних сторон закладки практически неизбежно. За счёт нагрева в дымовой трубе, «белый» дым можно испарить (сделать невидимым), но не сжечь, так что запах летучих продуктов пиролиза сохранится. Поэтому во многих случаях из-за соображений экологии стремятся сделать так, чтобы пламя при растопке как можно быстрее поднялось над дровами и дожигало летучие. Так, например, предлагается растопку производить наверху закладки (рис. 107а), а последующие закладки дров производить постепенно и понемногу. Однако, дачники, стремясь избежать дополнительной хлопотности, чаще всего сразу закладывают всё (необходимое для разовой протопки) количество

дров в топливник поверх растопки разом (как и предписывал ГОСТ 2127-47). Естественно, при этом поверхности поленьев, не прогретые до 270–320°C (которые «не лижутся» пламенем и не облучаются горячими 500°C стенками печи), начинают дымить белым дымом.

Дымление белым дымом полностью прекращается при разогреве стенок топливника выше 500°C (а это очень высокая температура для топливника) и/или дымовых газов в топливнике выше 800°C, поскольку внешние поверхности поленьев в закладке воспламеняются в этом случае от лучистого тепла, а внутренние поверхности поленьев в закладке воспламеняются за счёт горячих дымовых газов. Поэтому для быстрой растопки печи вслед за обеспечением тяги в трубе необходимо как можно быстрее нагреть стенки топливника. Это значит, что топливник не должен быть очень большим по размеру, чтобы огонь от растопочной закладки находился «в контакте» со стенками. Кроме того, стенки топливника должны быть малотеплоёмкими и теплоизолированными. Эти требования зачастую противоречат другим интересам дачника. Так, топливник является наиболее нагреваемым элементом печи, поэтому дачник стремится сделать топливником весь низ печи, чтобы именно низ печи прогревался лучше всего для создания теплового комфорта в помещении. В случае значительной мощности печи или необходимости крупных габаритов (монументальности) представительской (интерьерной) печи, топливник необходимо делать большим. Чтобы печь устойчиво «переваривала» всё новые и новые закладки дров (может быть низкого качества, мокрых), топливник должен быть как можно более теплоёмким, не остывающим при открытии дверки топливника и при закладке новых порций дров. Поэтому для предотвращения противоречий, используются специальные конструкции – жаровые камеры (огневые каналы), размещаемые в топливнике постоянно 8 или временно на период растопки 2 (рис. 139). Жаровая камера – это топка в топке, это раскалённая сердцевина топливника, воспламеняющая топливо. Аналогичные решения известны и в других областях техники, например, жидкое топливо распыляется в турбореактивном авиационном двигателе форсункой именно в раскалённую цилиндрическую трубу (жаровую камеру), где и происходит испарение капель жидкого топлива и воспламенение паров.

Жаровые камеры можно изготавливать из жаростойких бетонов или огнеупорного кирпича (поз. 6 рис. 118), но в таком случае они превращаются фактически в обычный топливник, а окружение вокруг – в конвективную систему из каналов и полостей (колпаков). Тем не менее, и такое, казалось бы, непоследовательное решение может быть оправдано стремлением оградить корпус топливника от чрезмерно высоких температур. Ведь при нагреве до 1000°C кирпич термически расширяется на 1% (1 см

на 1 м длины), и если жаровую камеру и топливник жёстко не соединять, то это может предотвратить растрескивание топливника. Кроме того, такое решение позволяет создавать большие печи с хорошо прогреваемым низом (несмотря на то, что площадь топливника в плане существенно меньше площади самой печи). Иногда огнеупорную кладку разрезают температурными (сухими) швами, которым порой придают и газодинамический смысл.

Однако, чаще всего в качестве жаровых камер используют системы малотеплоёмких экранов (отражателей) из металла (стали, чугуна) или огнеупорной керамики, желательной высокопористой (пенокерамики). Коэффициент термического расширения у стали $12 \cdot 10^{-6}$, но сталь обладает гибкостью. В простейшем случае жаровые камеры 2 и 8 представляют собой жестяные короба или зонты, временно для растопки вставляемые в топливник, а затем удаляемые. Зонты (даже в горячем состоянии) не должны касаться пламени во избежание дымлений из-за охлаждения и из-за ограничения поступления кислорода. Стационарные металлические экраны (поз. 6 рис. 118) в основном изготавливаются в виде удерживающих дрова стенок плоских 13 или цилиндрических 14 форм, а также в виде навесов плоских, конических и скатных форм 12 (рис. 139). Такими экранами отгораживают и холодные части топливников, например, змеевики водяного контура. Металлические экраны часто сочетают с трубными системами подачи вторичного воздуха. При прогаре дешевые металлические экраны могут планомерно заменяться. В больших печах различают первичные экраны 2, помогающие бездымно нагреться вторичным экранам 8, которые в свою очередь способствуют горению основной закладки дров 16. В России жаровые камеры и отражательные экраны в топливниках применяются редко, в основном лишь в отдельных металлических печах (поз. 13 рис. 103, поз. 15 и поз. 16 рис. 117), поскольку из-за общей низкой культуры на дым из печей (и дым от костров сжигаемых растительных остатков) в загородной жизни внимания пока не обращают.

Вне зависимости от того, имеет ли топливник жаровую камеру и/или стенки самого топливника рано или поздно прогреваются сами собой и/или закладка внутри себя самой сильно разогревается, в печи возникают мощные факелы – языки пламени 11, порой не только огибающие оболочки жаровых камер и топливника, но и залезающие в дымовые трубы прямоточных печей и догорающие в атмосфере над крышей. И маленькие, и большие факелы соответствуют случаю, когда продукты пиролиза образуют горючие смеси с концентрацией горючего компонента в воздухе выше ВКПВ. Чтобы наглядно пояснить особенности формирования факела, используем упрощённую модель «газовой горелки».

Представим, что из древесины вырываются струи паров креозота и, сгорая на воздухе, образуют языки пламени такие же, как, например, пламя парафиновой свечки или газовой горелки (рис. 139б). Горящие струи паров креозота хаотично сталкиваются, формируя сложную картину «вакханалии огня». При мощном разгорании дров из отдельных струй образуется консолидированная струя горящего газа от каждого полена и даже от всей закладки дров в целом 2, которая сгорает в виде единого факела 3 (рис. 140). Поскольку печь при этом работает как сжигатель горючих газов, часто в рекламных целях этот пламенный режим горения называют газогенераторным (что не совсем верно, поскольку в этом случае камеры газогенерации и горения не разделены).

Первичная суть факела заключается в том, что его оболочка 3 (контур пламени) является зоной горения (горячей, а потому и вязкой). При этом изнутри к этой оболочке диффундируют молекулы паров креозота, снаружи к оболочке диффундируют молекулы кислорода. В оболочке молекулы горючих веществ креозота тотчас реагируют с молекулами кислорода и исчезают, образуя иные молекулы продуктов горения (углекислого газа CO_2 и воды H_2O), которые в свою очередь диффундируют от оболочки 3. В результате химической реакции образующиеся молекулы оказываются в энергетически возбужденном состоянии (с электронами на удаленных орбитах или с атомами с большой амплитудой колебаний, деформаций и вращений), которые при неупругих соударениях с другими молекулами преобразуют потенциальную энергию внутренних возбуждений в кинетическую энергию разлетающихся молекул. Это означает, что максимальная температура достигается в оболочке факела, и горячая оболочка (причем высоковязкая) начинает всплывать вверх, формируя вытянутую форму струи горячего газа в виде светящегося контура языка пламени. Кстати говоря, пламя воздуха в горячем газе (внутри воздух, снаружи метан) визуалью аналогично пламени горячего газа в воздухе.

Концентрация молекул горючих газов и кислорода в оболочке пламени (в «топке»), конечно же, не равна нулю, поскольку в противном случае не было бы самих участников химической реакции. Но эта концентрация исходных продуктов в «топке» очень мала. Но и этого достаточно для быстрой конверсии реагентов при высокой температуре. Скорость подачи реагентов в «топку» равна градиенту концентрации по обе стороны оболочки. Поэтому для пламени абсолютно необходимо наличие высокой концентрации кислорода вокруг оболочки факела, но не просто «для потребления», а для создания самой причины возникновения диффузионного потока кислорода. Такой режим горения называется диффузионным (поскольку скорость горения ограничивается скоростью

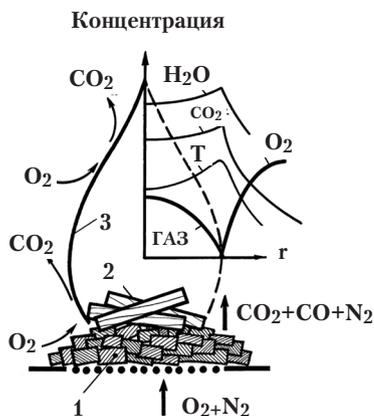


Рис. 140. Пространственное распределение концентраций горючих газовых составляющих (газа), кислорода, углекислого газа и паров воды в пламени (факеле) над закладкой дров. 1 – раскалённые угли на решётке, 2 – закладка дров, 3 – контуры пламени («язык»).

Сумма парциальных давлений всех газовых компонентов (включая содержание азота) всюду во всех точках внутри и вне факела равна 1 атм.

диффузии) в отличие от кинетического режима, когда скорость процесса ограничивается скоростью химического взаимодействия (реакции), как, например, при тлении или при биологическом окислении (гниении). Иными словами,

если мы видим факел, то это значит, что горючий газ и воздух разделены оболочкой, и в эту оболочку факела кислород из воздуха поступает ограниченно (со скоростью диффузии). Все факторы, способствующие поступлению кислорода в оболочку факела (повышенная температура, микротурбулентность и т. п.) будут работать на увеличение скорости реакции горения (И.Н. Зверев, Н.Н. Смирнов, Газодинамика горения, М.: МГУ, 1987 г.). Ламинарный же, например, обдув факела хоть и изменяет его форму (сдувает), но не изменяет сильно скорость горения. Это, в частности, означает, что если в топливнике факел ламинарно «закрутить» даже в спираль или дугу, то по- существу мы ничего не изменяем в плане горения (но можем изменить теплоотдачу в те или иные элементы топливника).

Продолжая рассуждения, вспоминаем, что плотность диффузионного потока реагентов в зону горения (в оболочку факела) и из зоны горения равна DdC/dr , где D – коэффициент диффузии компонента реакции, C – концентрация реагента, d/dr – производная (градиент) по радиусу. Значит, тепловую мощность факела можно оценить по качественному соотношению $Q=A_i \cdot S_i \cdot C_i / \delta_i$, где A_i – коэффициент пропорциональности, C_i – концентрация i -того компонента (O_2 , CO_2 , H_2O и др) реакции вдали от факела в топливнике (для горючих компонентов на оси факела) δ_i – толщина диффузного слоя для i -того компонента, S – площадь поверхности (оболочки) факела (языка пламени). Понятие толщины диффузионного слоя здесь аналогично понятию толщины ламинарного пограничного слоя (рис. 130). Высокотемпературная оболочка 3 факела (контур пламени) является высоковязкой зоной, а высокая вязкость означает высокую скорость диффузии и высокую теплопроводность (рис. 140). Конвектив-

ные явления в оболочках пламен не характерны. Напротив, вне пламени на некотором расстоянии от оболочки господствуют конвективные процессы массообмена: низковязкий холодный воздух обдувает пламя, уменьшая толщину диффузионного слоя (при характерных скоростях 1–2 м/сек весьма незначительно). То есть потоки воздуха (как и на рис. 130) у оболочки пламени замедляются из-за вязкости, и процессы непосредственно у оболочки происходят диффузионно в неподвижном (относительно оболочки) газе. Характерные расстояния перепадов концентраций, равные толщинам диффузионного слоя, в пламенах малы (не более миллиметров), что также обеспечивает превосходство диффузных явлений над конвективными.

Из приведённого простейшего диффузионного соотношения следуют далеко не очевидные следствия. Так, при росте тепловой мощности пропорционально растёт площадь поверхности свободного факела: увеличение в два раза тепловой мощности факела (то есть увеличение в два раза выхода летучих) влечёт за собой увеличение в два раза площади факела. Объём факела при этом увеличится примерно в полтора раза, высота же факела повысится тоже примерно в полтора раза. Если факел не свободен, а стеснён стенками топливника, то с ростом тепловой мощности пропорционально растёт и высота факела. Этим и объясняется правомочность (с некоторой натяжкой) введения понятия максимально допустимого теплового напряжения объёма топливника Q/v (см. раздел 5.7.3). Чем больше летучих содержится в топливе, тем меньше должно быть удельное тепловое напряжение топливника Q/v (теплонапряжённость топочного пространства):

Вид топлива	Q/v , кВт/м ³
Горючие сланцы	290
Дрова влажностью 50%	350
Дрова влажностью 25%	405
Торф брикетный	440
Каменный уголь	520
Антрацит	550

Если факел разбить, например, на 100 маленьких факелов (той же суммарной мощности), то общий объём факелов снизится в 1000 раз, а высота факелов в 10 раз. Это открывает заманчивую возможность повысить теплонапряжённость топочного пространства и снизить высоту топливника в несколько раз (что очень важно для кухонных плит, имеющих низкую высоту топливника). Разбить один факел на множество ма-

леньких факелов легко: просто надо взять более мелкие дрова (вплоть до стружки). Поэтому, для обеспечения бездымного пуска печи необходимо использовать мелкие, очень сухие дрова, причём при условии хорошей (но контролируемой) продуваемости всей закладки дров воздухом, причём закладки плотной, с небольшими зазорами между поленьями.

Но как раз с продувом дров свежим воздухом часто есть проблемы. Так, если решётка завалена слоем раскалённых углей, то весь кислород соединяется с углеродом углей, и в дрова (а затем и в факел) поступает инертная смесь N_2+CO_2+CO . Это значит, что горючие газы пиролиза разбавляются инертной составляющей, и их концентрация внутри факела снижается. При фиксированной тепловой мощности факела это приводит к увеличению площади поверхности факела, то есть увеличению высоты пламени в топке. Если же решётку с раскалёнными углями заменить раскалённым глухим подом, то разбавление уменьшится, и высота пламени в топке снизится.

Обычно, говоря о глухом поде, дачник почему-то чаще всего вспоминает глухой под камина, и тем самым может допустить серьёзную ошибку в оценках. Глухой под печи (особенно с герметичными дверками) кардинально отличается от глухого пода камина именно тем, что в камине на глухом поду воздух под горящие дрова проникает «вольно» (за счёт естественного подсоса на место всплывающего «отработанного» воздуха), а значит отовсюду вяло и «как попало». А в печи под дрова направляют ориентированную струю воздуха, ускоренную тягой трубы и раздувающую угли и пламя в заданной точке закладки. Так что скорость горения дров на поду бывает подчас намного большей, чем скорость горения дров на решётке. Во всяком случае в Европе глухой под в бытовых печах распространён очень широко (и не только из-за вековых традиций). А решётку применяют только при сжигании каменного угля, когда решётка просто необходима для удаления шлака. Более того, если продаётся металлическая печь (котёл) с решёткой, то подчас к ней прилагается керамическая плита для укладки на решётку на случай сжигания именно дров. Справедливость требует всё же отметить, что подовые топки более хлопотны в быту из-за необходимости более частой (но менее сложной) чистки от золы и более длительного догорания углей. Кроме того, в повседневной сельской жизни при ежедневной топке преимущественно сжигается разовая закладка поленьев (без последующих добавлений дров), а в этом режиме летучие сгорают в условиях несформировавшегося слоя углей на решётке, то есть в потоке воздуха (первичного).

Анализируя современное мировое состояние проектирования топок, Швейцарское центральное лесное ведомство подчёркивает целесообразность использования решёток в бытовых дровяных печах (вопреки реко-

мендациям правительственных органов США). Но решётку предлагается делать (и в печах, и особенно в каминах, в том числе и в виде корзины для дров на глухом поде) строго ограниченных размеров. Причём соотношение расходов первичного и вторичного воздуха должно отвечать конструкции камеры сжигания и виду древесного топлива (www.fao.org). Имеется в виду, что решётка в дровяных печах всё же создаёт значительные удобства в части удаления золы (пепла) и бывает полезной при розжиге печи, когда требуется совсем небольшой расход воздуха. А на этапе интенсивного (развитого, установившегося) горения, когда решётка обычно завалена горящими углями или обугленными поленьями, весь кислород потребляется на горение углей. При этом увеличение площади решётки с увеличением расхода воздуха снизу через слой углей влечёт за собой увеличение выхода летучих в условиях сильного нагрева дров раскалёнными углями, рост высоты пламени и снижение полноты сгорания летучих, в том числе с появлением дымления. Поэтому, небольшой размер решётки реализует достоинства решётки (на этапах растопки и дожигания углей) и достоинства глухого пода (на этапе установившегося горения).

Размер факела возрастает не только с повышением расхода горючего газа и с уменьшением концентрации горючего газа внутри факела, но и с уменьшением концентрации кислорода вне факела. Поскольку первичный воздух (через решётку) определяет расход и концентрацию летучих в факеле, а вторичный воздух определяет концентрацию кислорода вне факела, то варьируя соотношения первичного и вторичного воздуха можно в принципе регулировать высоту факела и степень сжигания летучих (включая и сажистые частицы). Но все эти зависимости весьма сложны. Например, подкидывая в раскалённую докрасна теплоемкую топку новую порцию дров, мы резко повышаем расход горючих газов за счёт «взрывного» пиролиза поленьев (А.Ф.Бацулин). Если при этом мы не изменяем расходов первичного и вторичного воздуха, то за счет быстрой выработки кислорода его концентрация у верхушки факела снижается и, несмотря на повышение концентрации горючего газа внутри факела, высота факела увеличивается. Факел вынужден «залезать в поисках кислорода» в дымоходы, где, резко охлаждаясь, выделяет чёрный дым (сажу).

Если же мы уменьшаем расход вторичного воздуха, не подбрасывая никаких дров и не изменяя расхода первичного воздуха, то высота факела тоже увеличивается. Но факел становится при этом внешне каким-то размытым, «диффузным», что обусловлено повышением прозрачности жёлтого пламени. Такой режим характерен для современных герметичных металлических печек и чугунных каминных кассет (еврокаминов со

стеклянными дверцами). Красивый необычный вид длинных пламен является декоративным достоинством продукции. При увеличении расхода вторичного воздуха пламена приобретают обычный вид костра.

В США рекламируются специальные режимы горения герметичных печей с длинными прозрачно-жёлтыми пламенами, обеспечивающими очень низкий уровень задымлённости выбросов в атмосферу. Чтобы пояснить суть этих режимов, напомним, что сажистые частицы зарождаются в виде ультрамикроскопических постепенно укрупняющихся образований - фуллеренов размером 5–50 нм (нанометров), затем кластеров 50–500 нм). Сажистые частицы образуются в нагретых газообразных продуктах пиролиза в ходе конкурентных процессов роста размера микробразований-зародышей (за счёт осаждения новых слоёв на частицу или коагуляции частиц-зародышей) и уменьшения их размера за счёт окисления (обгорания) их поверхностей (и окисления радикалов). Например, в диффузном пламени газовой горелки размер частиц сажи возрастает с высотой (над горелкой) и уменьшается при фиксированной высоте по направлению к внешним слоям пламени (G. Kroner, *Aerosol Science and Technology*, v. 37, № 10, p. 818–827, 2003). Так и в случае древесины сажистая частица, зарождаясь в углеводородных газах (ещё фильтрующихся внутри обугленного слоя на древесине), постоянно растёт до некоего максимального размера в пламени, после чего размер сажистой частицы начинает уменьшаться за счёт окисления. Для обеспечения сгорания сажи надо не допускать чрезмерного роста частиц. Просвечивая пламя свечи лазерной линейкой (с лучом света красного цвета с длиной волны 600 нм), легко видеть, что луч легко проходит жёлтое пламя без заметного рассеяния, что указывает, что размер частиц сажи менее 600 нм. Можно предположить, что если такие частицы резко заохладить для сохранения их размеров, то они в воздухе будут практически невидимыми (сизый дым). Многие, наверно, замечали едва видимый ореол вокруг пламени свечи, обусловленный микроскопическим дымом. Исследование ультрамелких дымов – одна из главных задач экологии, поскольку частицы размером между 1 нм (молекулы) до 100 нм (0,1 мкм) практически пока не изучаются, не идентифицируются и даже не детектируются в газах и жидкостях (в том числе и в атмосферном воздухе), хотя и вносят несомненно вклад в разные процессы (в том числе биологические). Дым с размером частиц менее 100 нм практически невидим, но тем не менее, ясно, что такой дым также неблагоприятен для здоровья человека, хотя вдыхается и выдыхается без осаждения.

Если сжигание дров производить на глухом поде со слабым нагревом поленьев от пламени, горящем при минимально возможной концентрации кислорода (в герметичной топке), то действительно можно получить

красивые (декоративные) длинные прозрачно-жёлтые пламена, полностью заполняющие топку и не дающие дымлений печи (www.heatkit.com), в том числе и по причине малости размеров частиц сажи. Кстати, мелкие частицы размером 0,1–0,5 нм могут излучать видимый свет с длинами волн 0,4–0,6 нм, но тепловое излучение с большими длинами волн 2–10 нм будет затруднено (холодное пламя). В то же время, при захолаживании кончика пламени (например, кончика пламени свечи кончиком обгоревшей спички) мелкие частицы сажи, переставая окисляться, тотчас мгновенно как-то коагулируют (объединяются) в более крупные комки (агрегаты), образуется «чёрный» дым, и лазерный луч тотчас начинает рассеиваться на образовавшемся дыме.

Сжигать летучие (в том числе и задымленные) всё же лучше там, где они образуются, то есть в тех же самых микротопках между горящими поленьями, где температуры велики и лучистые потоки огромны. Каждый легко может провести простейший эксперимент: направив струю воздуха от фена (разумно дозируя) через металлическую трубку прямо внутрь закладки горящих дров. Пламя тут же снизится и даже может исчезнуть вовсе. То есть при наличии внутри горящих дров достаточного количества свежего воздуха, можно сжечь летучие, не допуская их выхода на поверхность закладки дров. Такой режим бесфакельного раздува издавна используется кузнецами и металлургами в горнах с мехами с получением экстремально высоких температур в закладке дров до 1400–1500°C. В печах даже с решёткой такой режим крайне затруднён наличием плотного слоя раскалённых углей с большим сопротивлением движению газов: это требует разработки специальных объёмных решёток (не плоских), пронзающих каналами весь слой горящих дров. До сих пор такие объёмные решётки (в том числе и дополняющие глухой под) не созданы (по многим причинам). Вместе с тем всё чаще применяют (вслед за каминами) специальные металлические корзины для дров на глухом полу печи.

Отметим также неоднозначное влияние паров воды, которые выступают в роли продукта реакции и окислителя. При вводе добавочных количеств паров воды (например, подкладкой влажных дров) существенно снижается жёлтая светимость факелов, поскольку частицы сажи газифицируются. Чёткие очертания факелов размываются, становятся рваными, мечущимися. Тепловые потоки на стенки топки сокращаются (за счёт снижения лучистой составляющей), а дымообороты печи начинают греться заметно лучше (за счёт сгорания синтез-газа). Так или иначе, печи на этапе растопки дымят меньше, если в топливник добавить немного не совсем сухих дров.

В качестве примера топливных процессов рассмотрим особенности топливников колпакового типа. Вообще говоря, все топливники в той или иной мере можно рассматривать как «колпаки» с той или иной степенью проточности, поскольку скорости циркуляции газов в них обычно превышают скорости транзитных движений газа, особенно на этапе растопки. К достоинствам колпаков обычно относят (ошибочно) возможность прогрева их перекрытий до уникально высоких температур, что в сочетании с большим временем пребывания дымовых газов в застойной зоне у свода и обуславливает, якобы, уникальные дожигательные свойства колпаков.

Прежде всего напомним о несовместимости застойной зоны с экстремально высокой температурой и с высокими тепловыми нагрузками на поверхности. Теплообмен – есть обмен, а любой обмен происходит динамично. Горячий газ, надолго «застревая» в застойной зоне, хоть и долго охлаждается, но долго не даёт возможности проникнуть в застойную зону новым порциям «свежих» горячих газов. То есть для интенсивного нагрева какой-либо поверхности, её надо постоянно обдувать «свежим» горячим газом, но ни в коем случае не помещать её в неподвижный горячий газ. Проверить это очень легко с помощью газовой горелки кухонной плиты (рис. 141). Поставим на решётку газовой плиты кастрюлю с водой и замерим время, необходимое для закипания одного литра воды (рис. 142а). Затем поставим кастрюлю на цилиндрическую проставку 5 так, чтобы пламя 2 горелки 1 полностью проникало внутрь проставки (рис. 142в). Время закипания существенно увеличится. Причём, если проставку убрать вообще, а ту же кастрюлю подвесить без преград пламени на той же высоте, то время закипания может даже снизиться (рис. 142г). Всё это означает, что основную роль играет высота расположения тепловоспринимающей поверхности над пламенем, и повышение высоты не может быть скомпенсировано использованием колпака. Ещё более ярко это проявляется на этапе догорания углей, когда нагрев поверхности осуществляется в основном лучистым путём. Именно этим и объясняется низкая высота топливников кухонных плит, обеспечивающая хороший прогрев чугунной варочной плиты. При этом чугунную варочную плиту никогда не оснащают снизу колпаковыми элементами, а наоборот стараются сделать так, чтобы вся плита снизу свободно обтекалась (горизонтально) восходящим потоком горячих дымовых газов. Значит, вопреки расхожему мнению, неколпаковый (транзитный) свод печи нагревается сильнее колпакового (тупикового).

Так, например, если проставку 5 сделать не 40 мм, а значительно более высокой, то влияние транзитного потока через тупиковую полость станет разительным (рис. 142з). При высоте проставки 250 мм и диаметре

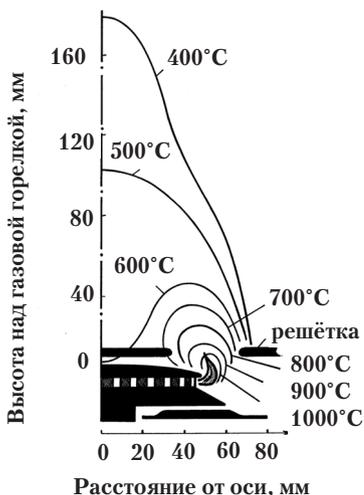


Рис. 141. Распределение температур в пламени газовой горелки бытовой кухонной плиты.

160 мм тепловой поток на дно плотно прилегающей к проставке кастрюли составит $7,5 \text{ кВт/м}^2$, а температура газов в полости будет равна 290°C . Если между кастрюлей и проставкой сделать щель, то тепловой поток на дно кастрюли увеличится до $9,5 \text{ кВт/м}^2$ при ширине щели 1 мм, до 20 кВт/м^2 при ширине щели 4 мм, до 23 кВт/м^2 при ширине щели 10 мм (температура в полости увеличится до 520°C). Если кастрюлю снять с проставки, то температура газов в свободной трубе снизится до 160°C ! Всё это относится к весьма значитель-

ной мощности пламени 1 кВт, способной обеспечить уровни тепловой нагрузки на дно кастрюли до 50 кВт/м^2 , как раз характерные для печей. Тепловые потоки на вертикальные стенки проставки оказываются всегда более низкими, чем на дно кастрюли (потолок колпака), составляя $3,0\text{--}3,5 \text{ кВт/м}^2$ и снижаясь при появлении транзитного потока.

Это значит, что если в вершине свода курной печи сделать конфорку (отверстие) и поставить на неё чайник, то чайник закипит быстрее тогда, когда между чайником и конфоркой имеется щель (то есть при неполном прилегании дна чайника к краям отверстия). Это (в общем-то не очевидное) заключение можно обобщить: например, если свод курной печи сделать дырчатым, то он будет нагреваться сильнее. А это уже очевидный вывод, поскольку именно так и нагревают фильтрующие каменки. Но при нагреве каменки её сопротивление растёт (из-за повышения вязкости газа), поэтому для улучшения её нагрева в каменке надо специально делать дополнительные широкие сквозные каналы. А это уже далеко не очевидно, но используется на практике, например, при погружении хайла вертикальной дымовой трубы в фильтрующую каменку (в том числе открытую). Кстати, открытую каменку можно продувать не дымовыми газами (загрязняя камни), а чистым воздухом снаружи внутрь, и нагревать каменку при этом исключительно лучистым теплом от углей и пламени. По аналогии можно заключить, что если в чёрной бане вывод дыма сделан у потолка, то потолок прогревается сильно. А если дым выпускать через низкую дверь, то потолок прогревается хуже, но зато объём воздуха в бане будет нагрет лучше (рис. 135г, д).

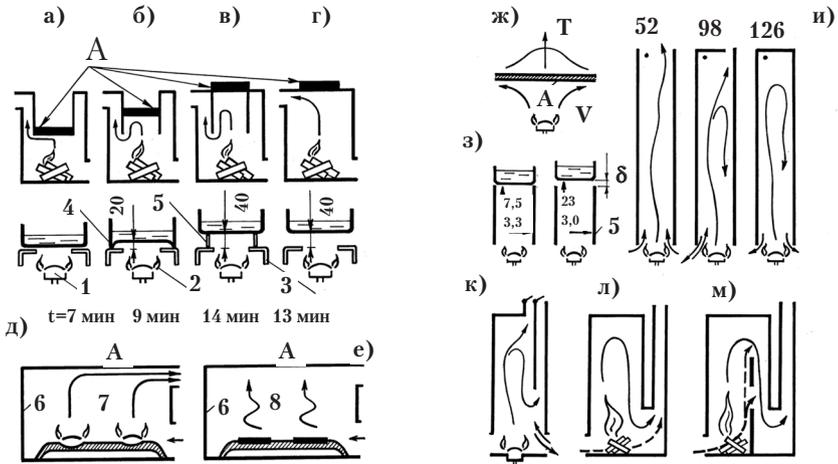


Рис. 142. Моделирование теплогазодинамических процессов в топках: а, б, в, г – оценка тепловых нагрузок на различный рода тепловоспринимающие поверхности А над пламенем дров в топке с помощью горелки кухонной газовой плиты (t – время, необходимое для нагрева воды в кастрюле до закипания); д – моделирование конвективного теплообмена в топке с помощью двухкомфорочной газовой плиты; е – моделирование лучистого теплообмена в топке с помощью двухкомфорочной электрической плиты; ж – неравномерность нагрева горизонтальной поверхности (дна кастрюли); з – оценка тепловых нагрузок на потолок тупиковой и транзитной полостей с помощью газовой горелки (цифрами указаны тепловые потоки в $\text{кВт}/\text{м}^2$ на потолок и стенки полости при мощности горелки 1 кВт, высоте проставки 250 мм и диаметре проставки 160 мм, зазоре $\delta = 10$ мм); и – моделирование вытяжной трубы проставкой высотой 1000 мм и диаметром 160 мм при мощности горелки 0,2 кВт (стрелками показаны потоки подсосываемого воздуха и потоки возвратного горячего газа; цифрами указаны температуры газа в верхней части проставки; тепловой поток на глухой потолок трубы $1,2 \text{ кВт}/\text{м}^2$, на потолок со щелью $1,8 \text{ кВт}/\text{м}^2$ вопреки пониженной температуре газа); к – переключение полости с тупикового в транзитный режим; л, м – пламя от дров в тупиковой (колпаковой) и транзитной (проточной, противоточной) схемах, сплошная кривая – траектория горючих газов (креозота), пунктирная – траектория транзитного воздуха. 1 – газовая горелка. 2 – язычки пламени, 3 – решётка кухонной плиты, 4 – вогнутое дно эмалированного ведра, 5 – проставка в виде отрезка стальной трубы (или кольца из листовой стали), 6 – металлический или кирпичный корпус модели топки, 7 – двухкомфорочная дачная газовая плита, 8 – двухкомфорочная дачная электрическая плита.

Что касается степени прогрева стен (чёрной бани, трубы, топливника) при разных высотных уровнях вывода дыма, то она, как правило, возрастает при снижении высоты вывода, что легко проверить на той же модели с проставкой 5 (выполняя боковые отверстия-выводы) или усложнённой (приближённой к натуре) модели на рисунке 142д. Особый интерес

с этой точки зрения представляют дымовые трубы, то есть те же проставки 5, но длинные и открытые сверху. В случае большого диаметра трубы мы имеем аналог водоподводящей системы (водопада), а при уменьшении диаметра – комбинацию «свободного» потока вверх (сквозного, транзитного) и «свободных» потоков внутри (циркуляционных местных), причём с разогревом трубы роль циркуляционных потоков уменьшается. Так вот, поставив на газовую горелку кухонной плиты открытую сверху проставку того же диаметра 160 мм, но длиной 1 м, мы тут же замечаем, что пламя горелки немедленно реагирует на наличие этой трубы (рис. 142и): начинала метаться, отрывалась от конфорки, гаснет (это так называемый срыв пламени от сильной тяги). Стоит только закрыть верхний торец трубы – пламя успокаивается (что и используется при проектировании промышленных газовых котлов со свободным пламенем, например, типа АОГВ). Срыв пламени обусловлен подсосом в горячую восходящую струю больших масс холодного воздуха (рис. 52), которые попросту сдувают пламя. Чтобы убедиться в наличии этого подсоса, достаточно поднести горящую спичку к нижнему торцу трубы: пламя спички подсасывается под торец внутрь трубы. Если же совсем закрыть верхний торец трубы, то пламя спички отклоняется от торца наружу – значит из колпака выходят какие-то газы. Конечно, это газы, которые ранее вошли в трубу, увлекаемые пламенем горелки, а теперь возвращаются из тупика наружу (рис. 133а). Если измерить температуру газов внутри трубы, то картина окажется более привычной, чем на рис. 142з: при открытой трубе она будет минимальной – 52°С (из-за разбавления продуктов горения подсасываемым воздухом), при закрытой сверху трубе – максимальной 126°С (как и «полагается»), поскольку колпак собирает наиболее горячие газы. Температура 126°С как раз и соответствует такому нагреву колпаковой трубы, когда труба отдаёт со своей поверхности наружу 200Вт кондуктивного (с теплопередачей 10 Вт/м²-град) тепла, то есть горелка мощностью 200 Вт передаёт колпаку практически всё своё тепло (как и полагается в гидравлической модели). Это обусловлено именно малой мощностью горелки. При более мощной горелке и соответственно при более высоких температурах газов в колпаке (более 300–500°С) картина была бы совсем иной (такой же, как на рис. 142з). Это указывает на то, что при растопке печи через летний дымоход целесообразна регулировка расхода воздуха именно верхней задвижкой на дымовой трубе так, чтобы воздуха для горения хватало, но не было бы ни излишнего холодного воздуха в приоткрытую дверцу печи, ни выбросов дымовых газов из дверцы. Температура газов внутри трубы при этом оказывается достаточно высокой для быстрого прогрева стенок. Столь же эффективной могла бы быть процедура первичного прогрева теплоёмкой кирпичной трубы

с помощью некой стартовой (пусть даже не утеплённой металлической) трубы, когда основная кирпичная труба на первичном этапе закрывается крышкой (задвижкой) сверху у устья и прогревается как высокий колпак (рис. 142к).

Описываемые явления при прогреве открытой трубы на рис. 142и объясняют, видимо, причины борьбы Грум-Гржимайло и Подгородникова с «балластными» (подсасываемыми) газами именно с помощью колпаков. Действительно, в наших экспериментах закрытая сверху (и прогреваемая только наиболее горячими струями восходящих газов) труба прогревается значительно быстрее (и до более высоких температур), чем просто открытая сверху. Подсос холодного воздуха в основание трубы (при появлении протока через колпак) действительно снижает температуру в трубе. Вместе с тем, и на этот полуприкрытый торец трубы тепловой поток $1,8 \text{ кВт/м}^2$ будет больше, чем на полностью прикрытый $1,2 \text{ кВт/м}^2$, не смотря на пониженную температуру газов (рис. 142и).

Подчеркнём, что опробованные режимы соответствуют реальным печным условиям: рис. 142з отвечает удельной мощности в топке 50 кВт на 1 м^2 пода и режиму развитого пламенного горения, а рис. 142и отвечает удельной мощности в топке 10 кВт на 1 м^2 пода и режиму разгорания дров или догорания углей. Так что, если надо повысить тепловую нагрузку на потолок топливника (например, в случае варочных плит), то дымовые газы следует выводить через отверстие (хайло), расположенное около потолка. А если, наоборот, надо понизить тепловую нагрузку на потолок топливника (например, чтобы предотвратить перегрев перекрытия и уменьшить растрескивание печи), то дымовые газы следует выводить через отверстие, расположенное значительно ниже (хотя бы на $300\text{--}400 \text{ мм}$) от уровня потолка (так, чтобы верхняя часть топливника выглядела бы как колпак). Поэтому, в отличие от прямоточных систем (в которых возможны сильные локальные перегревы мест набегания струй или обтекания потоками горячего газа), колпаковые системы выравнивают тепловые нагрузки на потолке. Вследствие этого схемы типа рис. 139г для отопительных печей более предпочтительны, чем схемы типа рис. 118е, хотя можно предусматривать и некие комбинированные схемы типа рис. 142м (при обеспечении высоты, достаточной для сгорания). Также, например, в топках (горнилах) русских печей дымовыводящее отверстие (устье) печи делают высотой пониже (чем свод), чтобы верх топки превратить в колпак (повышающий равномерность нагрева свода). Если бы устье было бы высотой с горнило, то свод бы нагревался сильнее у устья и слабей в глубине (то есть неравномерно, но в целом сильно). Это также легко проверить и промоделировать с помощью жестяных моделей над пламенем газовой плиты.

Иногда утверждают, что пламя в колпаке хорошо сжигает сажу и летучие за счёт большей продолжительности пребывания дымовых газов в колпаке. Это проверить тоже очень легко. Зажжём обычную парафиновую свечу и накроем пламя малотеплоемким быстропрогриваемым колпачком – перевёрнутым «стаканчиком» из алюминивей фольги (рис. 143б). Свеча постепенно гаснет. Этот факт известен давно – именно так (латунными колпачками на палке) гасили свечи в высоких люстрах во дворцах. Самое удивительное, что колпачок при этом снизу открыт, но кислорода в перевёрнутом стаканчике становится всё меньше и меньше, причём именно за счёт горения самой свечи. При этом можно наблюдать, как постепенно изменяется (краснея) пламя свечи из-за уменьшения концентрации кислорода под колпачком.

Природа явления очевидна: горячая оболочка пламени, устремляясь вверх, увлекает за собой продукты горения и сами горючие газы, располагаемые внутри пламени (факела). В результате, перевёрнутый стаканчик заполняется газами, не содержащими кислород. Засасывание свежего воздуха свободноконвективными струями (а также диффузия кислорода в среде инертных газов внутрь стаканчика) оказывается недостаточным. Уже издавна замечали, что искры от огня гаснут у потолка чёрной бани. Ясно, что указанное явление накопления бескислородной среды у потолка сосудов в беспламенных процессах невозможно.

Ещё более интересны наблюдения пламени свечи при разных высотах расположения стаканчика над свечой. Постепенно погружая пламя в перевёрнутый стаканчик можно заметить, что невозмущённое пламя сначала начинает удлиняться у верхнего кончика, из жёлтого превращается в красноватое, начинает дымить тонкой струйкой, покрывая копотью «потолок» стаканчика. Наблюдать укрупнение сажистых частиц в ходе пиролиза можно с помощью луча лазера (лазерной указки): жёлтое пламя луч не рассеивает, а краснеющее – начинает рассеивать.

Ещё более неблагоприятная ситуация возникает, если стаканчик сильно раскалён: в этом случае свеча в стаканчике тут же гаснет, а дым в стаканчик может вообще не проникать, поскольку подъёмная сила Архимеда для верхушки пламени, проникающей внутрь раскалённого стаканчика, исчезает, а напор струи в пламени свечи (в виде поступательной энергии, импульса) очень мал. Это значит, что горячий газ не поднимается в горячий колпак (как на рис. 119б), а обтекая, проходит мимо него (как на рис. 119в). Одновременно это указывает, что диффузные процессы проникновения молекул кислорода даже в столь малые открытые полости пренебрежимо малы. Значит, в реальных колпаках и полостях печей (в том числе и в топках русских печей) диффузией тем более можно пренебречь и полагать, что кислород в полости и каналы может в доста-

точных количествах поступать только за счёт транзитных движений масс воздуха. Характерные размеры объектов горения, в которых диффузия имеет значение (а тем более определяющее как в зоне пламени) не превышает нескольких миллиметров, что легко проверить и численными оценками. Установить количественную роль диффузии в воздухоподающих каналах очень легко: достаточно вставить в канал пушистый тампон из ваты: конвективная составляющая тотчас исчезнет, а диффузная сохраняется неизменной.

Когда-то, лет сорок–пятьдесят тому назад в научно-популярных журналах рекомендовалось изучать процессы в бытовых печах с помощью миниатюрных моделей из алюминиевой фольги с применением в качестве «дров» свечей. Такие рекомендации можно повторить и ныне (хотя интерес к конструированию печей в простом народе упал многократно, перестал быть массовым, как в эпоху развитой садоводческой лихорадки 1960-1970-х годов.). Прежде чем складывать или сваривать лично придуманную печь, можно сделать её уменьшенную модель (например, типа рис. 136) из жести или из толстой строительной фольги (а частично даже из оргалита с огнестойкой пропиткой) и опробовать её на улице «на лучине и бумаге» (особенно удобны были великолепно горящие закладки из молочных пропарафиненых бумаг и бумажных пакетов-пачек), подтверждая однородность прогрева и лёгкость растапливания. Очень удобны модели на двухкомфорочных газовых (имитирующих конвективную составляющую процесса) или электрических (имитирующих лучистую составляющую) плитках (рис. 142д,е). Можно делать и малюсенькие настольные модели печей (рис. 143г), в том числе и со множеством свечей. По отклонению приклеенных в исследуемых зонах шерстяных или хлопчатобумажных ворсинок можно судить о направленности газовых потоков. Напомним, что для корректного численного моделирования газодинамических сопротивлений (турбулизации) необходимо сохранять величину числа Рейнольдса $Re=f(G/a)$, то есть снижая расход газов G (и мощность, например, в 100 раз с 5 кВт в печи до 50 Вт в свече), необходимо одновременно уменьшить и характерный размер a (тоже в 100 раз!). Для численного моделирования свободноконвективных явлений («вольных» всплытий за счёт Архимедовых сил) необходимо сохранять величину числа Грасгофа $Gr=f(a^4/G)$, то есть снижая расход газов в сто раз, необходимо уменьшить характерный размер изделия в три раза.

Напомним, что задача бездымного сжигания именно светящихся пламен были очень актуальны когда-то во всех странах в связи с разработками приборов освещения, основанных на сжигании газообразных, твёрдых и жидких углеводородов. В частности, керосиновые лампы в обязательном порядке использовали стеклянные проточные трубы,

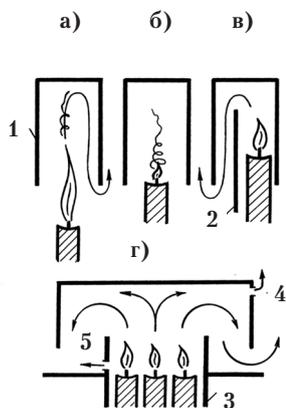


Рис. 143. Простейшие схемы с парафиновой (стеариновой) свечой и металлическим (стеклянным) стаканчиком: а – при погружении пламени в перевёрнутый стаканчик пламя удлиняется и начинает коптить, б – при подъёме свечи выше среза стаканчика свеча постепенно тухнет, в – при установке перегородки (например, из картона) свеча горит внутри холодного стаканчика (модель противотока), г – моделирование пламени полена множеством свеч. 1 – перевёрнутый стаканчик, 2 – перегородка, 3 – воздухоподающий узел (реализуется в печах в виде ограждения для дров над решёткой), 4 – пробное отверстие, подтверждающее наличие повышенного (избыточного) давления в колпаке, 5 – пробное отверстие, моделирующее разрывы (разрезы, сухие швы) для «вывода холодных газов в гидравлической модели» (для выяснения - с какой целью и выводятся ли на самом деле).

в том числе и в форме широко-известных когда-то профилированных колб (рис. 144в).

В таких приборах очень удобно изучать процессы возникновения дымлений (как за счёт недостатка кислорода, так и за счёт принудительного охлаждения факела, например, за счёт касания к холодному элементу).

Свечи хорошо горят в проточных полостях любых форм (рис. 144е, ж), но в колпаках не горят даже при разряжениях в системе: необходим вторичный воздух через штуцер А при наличии дымовой трубы (рис. 144з). Достаточно в опрокинутом стаканчике поставить перегородку 2, тотчас свеча начинает устойчиво гореть в холодном стаканчике (рис. 143в). Всё это объясняется тем, что установка в колпаке перегородки (разделки) с верхним перевалом организует сквозной (транзитный) проток свежего воздуха через колпак, сопровождающий горящее пламя и обозначенный на рис. 142л, м пунктирной стрелкой. Любые отверстия в этой перегородке ухудшают условия горения (рис. 142м), но могут снизить тепловые нагрузки (зачастую нежелательные) на потолок колпака.

Таким образом, колпак может работать как топливник лишь в первые моменты розжига холодной печи за счёт исходного запаса кислорода в объёме топливника. Затем, в уже нагретом колпаке возникает избыточное давление, и подать в колпак свежий воздух по какой-нибудь произвольной трубке не удастся. Но можно выпустить горячие газы из колпака, выполнив любое отверстие (в любом месте, но желательно повыше для более полной смены газов в колпаке) в корпусе (в стенке, в потолке) или запусив в колпак любую трубку. Тогда на смену выходящих газов, в колпак снизу (и именно только снизу) поступит свежий воздух. В этом

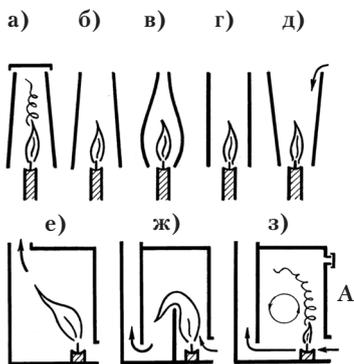


Рис. 144. Пламя свечи устойчиво горит во всех зонах проточных (транзитных) полостей: а – прикрывая верхнее отверстие полости (переводя транзитную полость в тупиковую), можно убедиться, что пламя гаснет в застойной зоне, б – сужающаяся жаровая камера (огневой канал), в – стеклянная колба керосиновой лампы лучше всего обеспечивает горение свечи, г – цилиндрическая жаровая труба, д – при расширении жаровой трубы возможно влияние нисходящих потоков холодного воздуха (особенно при малых проходных зазорах для ввода воздуха вниз), е – макет безоборотного топливника, ж – макет топливника с перевалом (для кухонных плит и широких печей, где пламя переводится в горизонтальную траекторию), з – в беспроточном тупиковом колпаке пламя тухнет, несмотря на разрежение в колпаке (при подаче пламени с напором горение возможно).

д) при расширении жаровой трубы возможно влияние нисходящих потоков холодного воздуха (особенно при малых проходных зазорах для ввода воздуха вниз), е – макет безоборотного топливника, ж – макет топливника с перевалом (для кухонных плит и широких печей, где пламя переводится в горизонтальную траекторию), з – в беспроточном тупиковом колпаке пламя тухнет, несмотря на разрежение в колпаке (при подаче пламени с напором горение возможно).

смысле схема противотока (рис. 145б) эквивалентна чисто проточной схеме (рис. 145а). Лишь закрыв нижний торец колпака (то есть трансформировав свободный колпак в замкнутый сосуд с патрубками ввода и вывода), можно создать в получившемся «колпаке» разрежение путём нагрева трубы и ввести в него свежий воздух через любое отверстие даже в верхней части «колпака» (рис. 145в).

Форма открытых колпаков и замкнутых сосудов может быть самой разнообразной, отвечающей потребностям конструктора. Для более полного дожигания сажи и летучих необходим длинный ничем не возмущённый путь факелу в присутствии кислорода вне факела. При этом возможны два основных варианта. Во-первых, это высокий 800–1000 мм топливник, желателен профилированный, чтобы языки пламени «не болтались как попало» и не касались бы стенок топливника (рис. 145 г). Такой вариант подходит для высокого расположения фильтрующих камер, весьма эффективного для белых паровых бань (рис. 145д). Во-вторых, это перевод пламени в горизонтальное или даже в нисходящее направление, чтобы сократить высоту печи или чтобы сделать печь пошире, более «массивной» внешне (рис. 145е). При этом необходима сильная тяга дымовой трубы, чтобы пламя не касалось перекрытий топливника. Но и не допустимы мощные крупномасштабные турбулентности, порой даже «рвущие» пламя на отдельно горящие «кочья». Поэтому и свод, и перевал желателен выполнять плавными. При этом распределение газовых потоков (траекторий) будет определяться не только особенностями ввода воздуха, но и конструктивным оформлением выход-

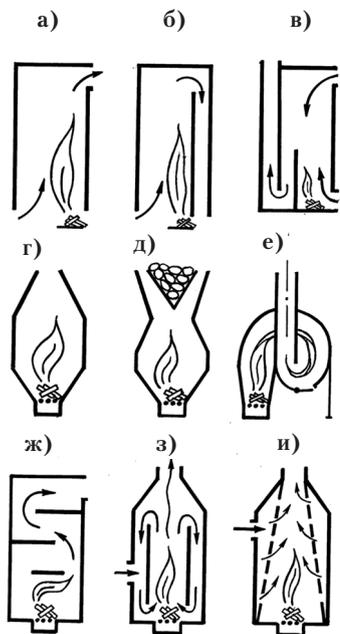


Рис. 145. Модельные схемы топливников: а – транзитный (прямоточный), б – транзитный противоточный (contraflow), в – замкнутый под разрежением трубы, г, д – сужающийся транзитный, е – транзитный с разворотом пламени вниз, ж – транзитный прямоточный с рассекателями и горизонтальными оборотами, з – транзитный прямоточный со смешительной схемой ввода вторичного воздуха, и – транзитный прямоточный с вытеснительной схемой ввода вторичного воздуха.

ных (сточных) отверстий из топливника (рис. 48).

Подобная схема оказалась когда-то очень плодотворной в металлоплавильных печах (рис. 146). Горячий факел 1 омывает огнеупорный теплоизолированный свод 2, который в свою очередь за счёт собственного теплового излучения 3 греет ванну с горной породой 6 (например, с получением меди $\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2$).

Факел 1 должен быть при этом как можно более длинным, не касаться свода и сильно излучающим (содержащим много крупной сажи) за счёт специально вводимой в факел сильно дымящей добавки (например, битума, мазута и т. п.) для передачи большого количества лучистого тепла на свод и в ванну. Такие печи называются по-разному: пламенными, факельными, отражательными и т. п. Идея таких печей в чём-то созвучна русским бытовым печам (рис. 123б). Мыслимы такие печи и для нагрева банных каменок сверхкрупных размеров (рис. 146).

Повышенные тепловые нагрузки на потолки транзитных полостей обуславливают широкое распространение теплосъёмных рассекателей в прямоточных полостях (а также горизонтальных дымооборотов), являющихся фактически теми же (но многоуровневыми) потолками транзитных полостей (рис. 145ж).

Наиболее распространёнными в бытовых печах (и в деревнях, и на дачах) остаются прямоточные (чисто транзитные) топливники с хайлом в перекрытии (и в кирпичных, и в металлических печах), обеспечивающие лёгкую оперативную чистку (рис. 101а). Ввод вторичного воздуха в таких топливниках предусматривается далеко не всегда, но не представляет технических проблем. В современных металлических печах заводского изготовления вторичный воздух подаётся, как правило, из поддувала по специальной трубке в верх пламени. При этом вторич-

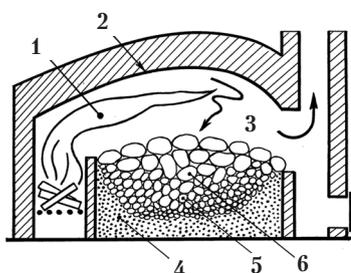


Рис. 146. Схема пламенной (отражательной) печи для нагрева (плавки) камней (породы) на поде (на дне ванны). 1 – факел пламени (лучше светящийся), 2 – отражающий свод огнеупорный, 3 – излучение со свода, 4 – ложе ванны из мелких камней или песка (для теплоизоляции), 5 – слой камней среднего размера, 6 – верхний слой (засыпка) крупных камней.

ный воздух начинает подаваться автоматически только тогда, когда появляется сопротивление колосниковой решётки, обусловленное накоплением углей. Такой ввод часто дублируется независимым прямым вводом непосредственно из атмосферы, управляемым вручную.

Все печи исторически и технически родились именно из топливников (топок) и всегда имеют так или иначе оформленный топливник как самую главную часть печи (топкой *по-древнерусски*, каминусом *по-латински*, очагом *по-турецки* называли площадку для разведения огня). Поэтому и классификацию схем печей правильной было бы вести исходя не только из типа конструкций дымооборотов (как это было сделано в ГОСТ 2127-47), но и исходя, причём преимущественно, из конструкции именно топливников, не забывая при этом и об условиях горения дров (топки подовые и колосниковые, высокие и низкие, теплоёмкие и малотеплоёмкие и т. п.). Так, например, различают смесевой ввод вторичного воздуха (когда свежий воздух подмешивается к циркулирующим газам в топливнике больших размеров), вытеснительно-смесевой ввод (рис. 145з), вытеснительный распределённый ввод (рис. 145и).

Особо остановимся на развитии представлений о роли и типах дымооборотов как продолжения топочного пространства. В самых первых канальных печах топливник (то есть топка) был чётко обособлен и занимал (и представлял собой) весь низ печи, а всё то, что было над топливником, являлось насадной дымовой трубой, в том числе и с дымооборотами для дополнительного, более сильного отбора тепла из дымовых газов (рис. 101а). Такая схема печей (с «оголённой» топкой) до сих пор остаётся основной для сельских и дачных условий. В этой схеме удаётся выделить и отдельно проанализировать количества тепла, поступающие на отопление помещений отдельно со стенок топки и отдельно со стенок дымооборотов.

Прежде всего отметим, что сама по себе топка (при сухих дровах) может иметь высокий КПД (в смысле большого отбора тепла от пламени и углей), достигающий 60–70% в обычных русских печах и даже обыч-

ных металлических буржуйках (вопреки ошибочным заключениям в ГОСТ 2127-47). Залогом высокого КПД являются «холодные» (способные к теплоотбору) стенки топливника (с температурой не выше 200–500°С) и ограниченный расход воздуха (малый коэффициент избытка воздуха). Как только внутренние стенки топливника раскаляются, тотчас горячие газы, не успевая остыть в топливнике, устремляются в дымообороты. Температура внутренних стенок определяется мощностью теплового потока и зависит от мощности пламени. Так, мощность в топке 30 кВт/м² никак не может сниматься кирпичными стенками, поскольку внутренняя поверхность кирпичной кладки быстро нагревается вплоть до 900–1000°С и теряет способность отбирать тепло (хотя снаружи печи кирпичная кладка ещё холодная. А при мощности в топке 3 кВт/м² тепло успевает уходить в кирпичную кладку, что легко проверить по формуле для теплопроводности кирпича. Поэтому в быту, чтобы прогреть отопительный щиток (дымообороты), надо обеспечить интенсивное и быстрое прогорание крупной разовой закладки дров в топке, чтобы внутренние стенки топливника (а затем и стенки дымооборотов) стали раскалёнными. При этом температура наружных стенок и топливника, и щитка станет повышаться только после окончания топки (после «выстаивания» печи). А если дрова подбрасывать по чуть-чуть и долго, то КПД топливника резко увеличится, но дымообороты, может быть, останутся холодными (а сама процедура протопки станет хлопотной).

Таким образом, количество тепла, выделяемого в топке, определяется особенностями конструкции топливника и особенностями горения дров. Особенности конструкции топливника формируют в первую очередь температуру стенок топливника (обращённых к огню). Холодные стенки топливника (грубо говоря, ниже 300–500°С) отбирают примерно 20–40% конвективного тепла от пламени и до 80–90% лучистого тепла от углей. А горячие стенки топливника (грубо говоря, выше 700–900°С) практически не отбирают конвективное тепло от пламени, поглощая лишь 20–50% лучистого тепла от углей. Неотобранное топкой тепло поступает в дымообороты. То есть, чем холодней топка, тем выше ее теплосъем.

Что касается особенностей горения дров, то они в первую очередь определяют, насколько много углей остаётся после пламенного горения. Если используются сухие дрова и малые избытки воздуха, то получается много углей, вследствие чего до 60–70% тепла сгорания дров выделяется именно на этапе горения углей в виде лучистого тепла, хорошо поглощаемого стенками топливника. А если используются сырые дрова, то угли газифицируются (не образуются), лучистого нагрева нет, и подавляющее количество тепла от сжигания дров выносится в дымообороты, и теплосъем топливника мал.

Исходя из этих соображений становится ясным, что для эпизодических топок сухими дровами, особенно зимой, дымообороты лучше не предусматривать вообще (или делать их очень малотеплоёмкими, например, металлическими). Это обусловлено тем, что основная масса тепла выделяется в топке, и это тепло очень хорошо поглощается холодными (за счёт теплоёмкости или высокой теплопроводности) стенками. Теплоёмкие же обороты (в том числе в виде отопительных щитков) при эпизодической разовой топке не успевают прогреться и лишь отбирают наружной поверхностью тепло из помещения (как куча холодного кирпича), вследствие чего порой требуют теплоизоляции снаружи, чтобы не выстуживали помещение. Поэтому наилучшей конструкцией садовой отопительной печи является обычная кухонная плита (с кирпичными при необходимости аккумуляции тепла стенками) и с перекрытием в виде чугунной варочной плиты, причём варочную плиту желательнее располагать повыше над пламенем для обеспечения высокой степени догорания летучих. Наиболее нагревающиеся части топки можно футеровать (утолщать) изнутри (для повышения теплоёмкости и снижения темпа нагрева) или же ограничивать около них скорости движения горячих дымовых газов. Ещё более удачной для зимних условий будет металлическая печь, окруженная (с зазором) экраном из кирпичной кладки (при необходимости теплоаккумуляции) или из металлического листа (при необходимости очень быстрой протопки). При этом все холодные участки кирпичной кладки необходимо теплоизолировать от помещения, в том числе и дымовую трубу.

В связи с проблемой отопления многоэтажных зданий городского типа в Европе в XVII веке возникла необходимость опускать дымовые газы до уровня дна топливника, что привело к частичному загораживанию (охвату снаружи) части стенок топки опускными (нисходящими) дымовыми каналами (рис. 101в). Дело в том, что в высоких зданиях дымовые трубы стали делать не насадными (опирающимися непосредственно на саму печь), а коренными, опирающимися на собственное основание (фундамент). Коренные трубы монтируются независимо от печей и прокладываются зачастую в толще конструкции самого городского здания (стенные трубы). Поскольку при протопке высота печи (из-за линейного термического расширения нагревающегося кирпича) возрастает, верхнее подключение печи к дымовой трубе чревато механическими (хрупкими) разрушениями горизонтального дымового патрубка (при недостаточной его гибкости). Если же соединяющий патрубок располагается внизу у основания печи (остающегося при топке холодным), то проблем растрескивания патрубка не существует. Опускные каналы могут охватывать и всю топку вокруг, например, как в печах противотока

Вимана (рис. 118е). Опускные каналы могут выполнять и роль полостей, в которых располагаются духовки, камеры для выпечки хлеба, сушки и т. п. (рис. 118г). Опускные каналы стали выполняться и в печах с насадными дымовыми трубами (в печах с повышенной теплоотдачей с большой внешней поверхностью или в декоративных печах с повышенной массивностью). Имеется в виду, что не в силах увеличить значительно размер топливника, печники, в целях повышения внешних габаритов печи, направляют дымовые газы из топливника в каналы и полости, окружающие (полностью или частично) топливник.

Топки без опускных каналов (а также печи без опускных каналов вокруг топки) называются голландскими, а топки с опускными каналами вокруг топки - шведскими. Печи с опускными каналами вокруг топки называются в США «Contraflow», в Германии «Grundofen», в России «Степанова-Браббе», в Австрии «Sturzzung», в Швеции «Royal Crown», в Финляндии «BioFige» и т. д.

Такие печи с «загороженными» (ограждёнными, закрытыми, заслонёнными) топливниками имеют то отрицательное свойство, что не используют напрямую наиболее ценную часть тепла – лучистую от углей и пламени, которую в промышленных теплогенераторах стараются никогда не переводить в конвективное (очень трудно улавливаемое) тепло. При этом стенки «загороженного» топливника могут выполняться как высокотеплоёмкими (запасающими тепло, но плохо выводящими потом его в помещение), так и низкотеплоёмкими, которые быстро прогреваются и выполняют роль жаровых камер, нагревающих лучистым теплом и дрова, и стенки печи. Ясно, что такие низкотеплоёмкие топливники ценны в эпизодически протапливаемых печах с разовой закладкой, а высокотеплоёмкие – в постоянно (один или два раза в день) протапливаемых, особенно с многократной подкладкой топлива разного качества. Подчеркнём, что «загороженные» со всех сторон топливники получили широкое распространение в России лишь в последние десятилетия в котеджах, поскольку в сельской местности для отопления жилых помещений площадью более 40 м², как правило, стремятся установить в кирпичную или чугунную печь контур водяного отопления, и не увеличивать поверхности печи для повышения теплоотдачи.

Ведущую роль в экспериментальном изучении и проектировании кирпичных печей с опускными каналами топливника играет Гильдия печников Карелии (С.И.Серегин, С.В.Кириллов). Причем изучались и теплотехнические параметры печей, и характеристики горения с контролем состава дымовых газов.

Металлические печи с опускными каналами топливника изучались в ООО «Суховей» (А.П.Ферингер).