

### 5.7.12. Нагрев каменок в печах

Закрытые фильтрующие каменки периодического действия в начале топки загрязняются пеплом, сажей и смолами. Поэтому во избежание отравления людей во время парения угарным газом, каменку приходится обжигать прокаливанием до высоких температур 700–1000°С. Столь сильный нагрев, хоть и является гордостью бытовых печников, совершенно не нужен для парения и даже затрудняет получение мягкого пара.

С аэродинамической точки зрения фильтрующая каменка представляет собой газоход со множеством параллельных сливающихся и разделяющихся извилистых каналов между камней (то есть стационарный зернистый слой), причём с ламинарными, как правило, потоками дымовых газов ( $Re < 2300$ ). Сопротивление трения (силы вязкости) обычно превышают сумму местных газодинамических сопротивлений. Поэтому, если камни заполняли бы всю дымовую трубу до верха и имели бы одну и ту же повышенную температуру на всех высотных уровнях, то расход дымовых газов совсем не зависел бы от высоты дымовой трубы: и совсем невысокая труба, и очень высокая пропускали бы через себя одно и то же количество дымовых газов (рис. 148а и б). Этот неожиданный результат объясняется тем, что чем выше труба, тем больше тяга, но во столько же раз больше сопротивление трения газового потока о камни. В то же время, если верхняя часть трубы освобождена от камней, но имеет ту же температуру, что и нижележащие камни, то расход был бы существенно большим (рис. 148в). Аналогичные зависимости имеют место во влагонасыщенных фильтрующих грунтах при течении воды под собственным напором.

Раскалённая каменка хоть и оказывает существенное сопротивление раскалённым дымовым газам (обладающим к тому же при высоких температурах высокой вязкостью), но не предотвращает их фильтрацию. Основная сложность возникает при первичном прогреве каменки: горячие дымовые газы тотчас остывают в холодной массе камней (имеющих температуру зачастую ниже температуры воздуха вне бани) и вверх не идут. Поэтому обязательным элементом закрытых каменок является обходной растопочный канал 2 (в том числе внутри камней), обеспечивающий первичный (а порой и постоянный) прогрев трубы для создания тяги. Использовался и промежуточный вариант с полупогружённой трубой (рис. 143в).

Процесс последовательного нагрева каменки фильтрующимися дымовыми газами протекает не столь уж просто, как можно было бы предположить с первого беглого взгляда. Горячие дымовые газы сначала отдают своё тепло нижним камням и, несколько охладившись, перемещаются вверх, где вновь отдают своё тепло и вновь охлаждаются и перемещаются вверх. Может сложиться впечатление, что камни на каждом высотном

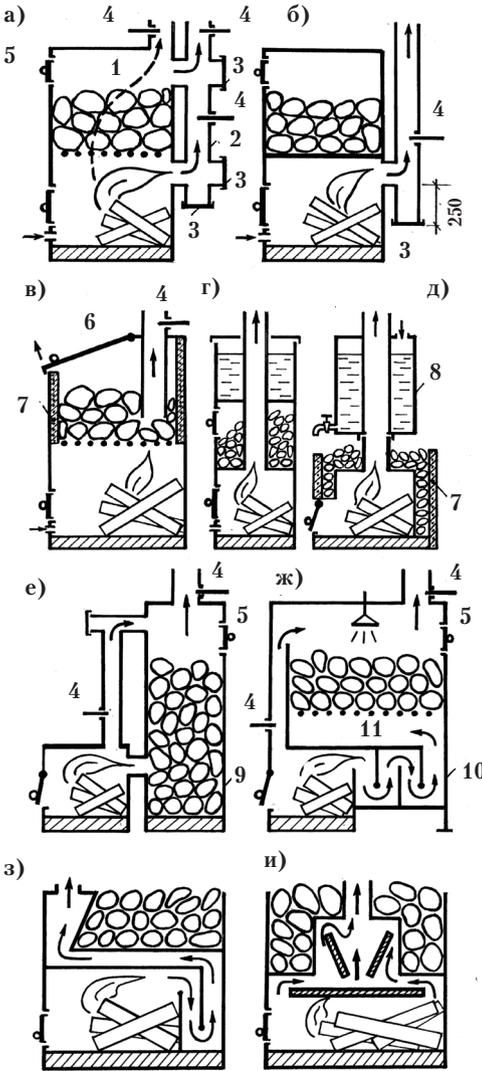


Рис. 147. Принципиальные схемы металлических печей-каменок: а – каменка на решётке, продуваемая дымовыми газами (для первичного прогрева дымохода и создания тяги используется летний дымоход), б – каменка на металлической плите (каменка непрерывного действия постоянного нагрева), в – каменка на решётке с затопленной в камни дымовой трубой, г – широко распространённая схема печи самоварного типа (в том числе круглая), д – каменка, охватывающая металлический топливник, в теплоизолированном кожухе, е – фильтрующая каменка в расширении дымовой трубы, ж – каменка на решётке над дымооборотами, з – печь с дымооборотами, и – печь с рассекателями пламени.

1 – пронизывающий поток дымовых газов, 2 – система летнего дымохода, 3 – прочистное отверстие с заглушками, 4 – задвижка, 5 – дверка для подачи воды в каменку и для вывода пара, 6 – расширяющаяся крышка каменки, 7 – теплоизоляция термостойкая (перлит, вспученный вермикулит и т. п.), 8 – насадная водоохлаждаемая дымовая труба, выполненная в виде водонагревателя, 9 – отдельностоящий корпус каменки, желательно теплоизолированный, 10 – завихривающие дымообороты, энергетически малоэффективные, поскольку не отбирают лучистое тепло от углей, 11 – решётка распределительная.

уровне нагреваются исключительно от дымовых газов, имеющих на каждом высотном уровне свою температуру, понижающуюся вверх и повышающуюся по времени (из-за постепенного прогрева нижних камней). Однако, более детальный анализ показывает, что достаточно плотные каменные засыпки имеют собственную теплопроводность (через точки контакта камней, а также за счёт передачи лучистого тепла) настолько высокую, что выделившееся в нижних слоях камней тепло тотчас распрост-

раняется по всей засыпке камней отнюдь не благодаря дымовым газам, а исключительно за счёт теплопередающих свойств самой каменки (см. раздел 5.5). Оба предельных случая имеют свои недостатки и свои достоинства. Рыхлая каменка имеет низкое газодинамическое сопротивление в разогретом состоянии, но медленно разогревается (долго не создавая тягу), а нижние камни перегреваются. Плотная каменка имеет повышенное газодинамическое сопротивление в разогретом состоянии, но зато быстро разогревается по всей высоте (тотчас создавая тягу), и все камни в ней достаточно равномерно прогреты. Ещё меньше влияние на внутренние зоны каменки оказывают дымовые газы в случае расположения каменки непосредственно над топковником (рис. 147а), когда нижние слои каменки разогреваются не столько дымовыми газами, сколько лучистым теплом от раскалённых углей. В этом отношении закрытые каменки сильно различаются между собой в зависимости от того, доступно ли им лучистое тепло из топковника или нет. Так, каменки, расположенные в расширениях дымовых труб и греющиеся исключительно дымовыми газами, как правило, греются намного хуже (рис. 147е), чем каменки, которым доступно лучистое тепло из топки (рис. 147а), хотя, конечно, монтаж закрытой каменки в дымовой трубе позволяет существенно повысить коэффициент полезного действия печи. Так или иначе, каменку лучше греть лучистым теплом от углей (которое составляет 60% от всего тепла).

Закрытые фильтрующие каменки на дровах встречаются в настоящее время уже редко - только лишь в дорогих кирпичных печах для любительских бань при очень квалифицированной эксплуатации (М.А.Соколов). Открытые каменки в закрытом контейнере (рис. 143 б и г) и открытом (рис. 147д) являются более гигиеничными, простыми в эксплуатации и не оказывающими сопротивления дымовым

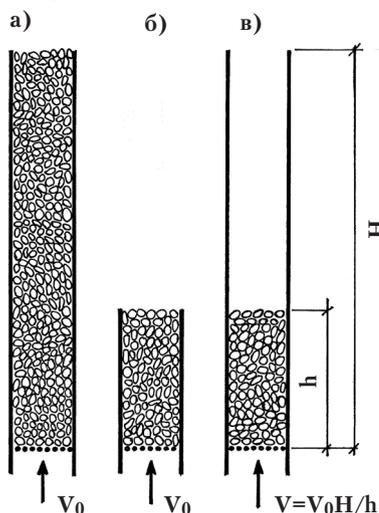


Рис. 148. Модельные варианты каенок, заполняющих дымовую трубу: а – высокая труба, полностью до оголовка наполненная камнями, б – низкая труба, полностью до оголовка наполненная камнями, в – высокая труба, частично наполненная камнями. Если температура в трубе всюду (и в камнях, и в пустотах) одинакова и выше температуры атмосферного воздуха, то скорости подъёма дымовых газов за счёт гравитационных перепадов давления (тяги) в примерах а и б равны между собой, а в примере в скорость возрастает пропорционально высоте трубы и обратно пропорционально высоте заполненного участка.

газам (И.Ф. Курин, Патент РФ30420). Открытые каменки хорошо сочетаются с металлическими печами, являющимися сейчас основной подавляющего числа дачных бань. Каменки размещаются вокруг топливников или в контейнерах внутри топливников и дымоходов (примерно так, как кухонные духовки).

Основную долю энергии печь выдаёт в виде лучистого тепла от углей и пламени, причём это тепло очень легко поглощается стенками теплообменных элементов, в том числе и стенками контейнера каменки (в отличие от кондуктивно-конвективного тепла). Поэтому целесообразно конструировать печи таким образом, чтобы всё тепло от углей беспрепятственно попадало на внешние стенки топливника, в том числе контейнера, эффективно охлаждаемые в свою очередь лучистыми потоками на стены бани (или на экраны печи) и/или мощными конвективными потоками и/или засыпками камней и/или лучше всего водой. Любые экраны внутри топливника могут существенно поглотить лучистые потоки тепла внутри топливника и трансформировать их в конвективные (дымовые) потоки тепла, поглотить которые стенками теплообменных элементов затруднительно, особенно при высокой температуре стенок (то есть охладить горячие газы труднее, чем поглотить лучистое тепло от углей). Отсюда следует, что варианты печей с внутренними дымооборотами (рис. 147 ж, э, и), отгораживающими контейнер каменки от углей и пламени, не могут рассматриваться как удачные решения для нагрева стенок каменки. Тем не менее, в ряде случаев экраны внутри топливника оказываются полезными, но не каменке, а самой печи, поскольку несмотря на общее снижение лучистых потоков на стенку топливника, они могут обеспечить (как жаровни) повышенный нагрев дров в период пламенного горения или, например, перераспределить лучистые потоки, в частности, предотвращая перегрев отдельных узлов печи. Но, как правило, в топливнике необходимо устранять все экраны (в том числе и сами дрова), между углями и важными стенками топливника, а уж потом при выводе дымовых газов в дымовую трубу можно использовать экраны как жаровни и дымообороты как газозавихрители с целью отбора тепла дымовых газов.

В последнее время в Финляндии, а затем и в России разработано большое число металлических печей для саун с открытыми каменками (в том числе и в закрытом контейнере-термосе). Для русских бань рекомендуются металлические печи-каменки типа «Вулкан» и «Бульрьян» с нагревом камней от топки (рис. 149). Характерной особенностью каменок этого типа является наличие в нижней части воздухоподающих щелей 5 (отверстий), прикрываемых специальными заслонками (клапанами), в том числе распахивающимися. Открывая заслонку, можно обеспечить доступ потока воздуха снизу в насыпку камней. Производи-

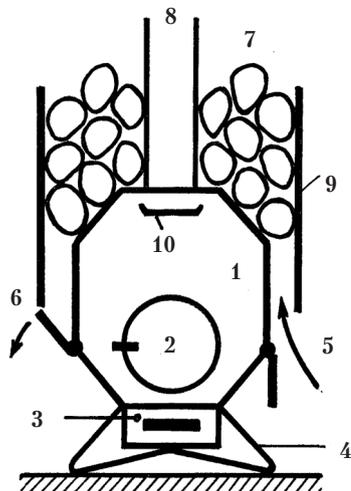


Рис. 149. Принцип действия открытой каменки для саун по версии «Вулкан» и «Булерьян»: 1 – металлический топливник, 2 – дверка, 3 – зольник, 4 – ножки печи, 5 – открытый канал для подачи воздуха в каменку при распахнутой воздушной заслонке, 6 – воздушная заслонка в закрытом положении, 7 – камни внавал, 8 – дымовая труба, 9 – контейнер для камней, 10 – рассекатель (завихритель) пламени.

тели считают, что режим с открытыми заслонками имитирует «сухой жар сауны», а режим с закрытыми заслонками имитирует «влажный пар русской парной». Поясняется при этом, что с открытыми заслонками осуществляется интенсивное потоотделение в сухом воздухе (без поддач) при температуре

воздуха 100–130°C и относительной влажности воздуха 0–10%. Затем парную проветривают, снижая температуру до 50–55°C, после чего температуру и влажность воздуха в парной поднимают, поддавая воду на раскалённые камни при закрытых заслонках. Технически указанное решение интересно (хотя и малоэффективно), позволяет в какой-то степени варьировать банные условия по желанию пользователя, осознанно учитывая аэродинамические особенности бань различного типа. Однако, особый интерес представляет иной режим, когда сначала камни прогревают при закрытых заслонках, а затем льют воду на камни при открытых заслонках. Получается уже не поток пара, а поток смеси воздуха с паром, имитирующий поток горячего влажного воздуха от веника в паровой бане. Такой поток влажного пара менее подвержен туманообразованию при смешении с более холодным воздухом бани, но тем не менее способен выделять конденсат на потолке бани. К сожалению, естественный поток воздуха через каменку слишком мал, чтобы образовать требуемую паровоздушную смесь с температурой 60–65°C и относительной влажностью 60–65%: нужны электровентилятор и строго дозированный ввод воды.

Многие конструкторы металлических печей-каменок любят специальные мелкие дымообороты в начале дымовой трубы, преимущественно горизонтальные, в районе каменки (в частности, называемые лабиринтными теплообменниками (рис. 147и, рис. 149)). Эти дымообороты могут оснащаться различного рода «рассекателями пламени», турбулизаторами дымовых потоков, завихрителями, повышающими, якобы, теплоотдачу, в первую очередь, в каменку. Как уже отмечалось выше, такие завих-

рители допустимы лишь в том случае, если они не отгораживают каменку от топки, то есть расположены в дымовой трубе. Эти дымообороты, как и любые местные газодинамические сопротивления (повороты, развороты, расширения и т. п.) увеличивают скорость движения дымовых газов в вихрях и могут повысить коэффициенты местной теплопередачи в стенку трубы с 10 до 30 Вт/м<sup>2</sup>-град. Но заметную эффективность завихрителей в части теплоотдачи можно ожидать лишь на этапе пламенного горения дров, когда лучистые потоки от углей малы. Именно на этом этапе дымообороты подвержены сажеосаждению, ухудшающему теплообмен. Все лабиринты необходимо оснащать технологическим заглушками для чистки сажи. Если подобные мелкие лабиринтные дымообороты забиваются сажей или «слишком» турбулизируют поток с уменьшением тяги в трубе, их необходимо удалять.

Наиболее широко используются горизонтальные дымообороты, охватывающие контейнер с камнями, который в свою очередь погружён в топливник (рис. 150). Контейнер с «талией» 10 удобен тем, что образует вокруг себя огневой канал 18, отделяющий контейнер от стенки печи 1. Канал 18 выполняет роль теплоизолятора и одновременно нагревателя. В финских печах длинные стороны дна контейнера обычно приварены к стенке печи 1 таким образом, чтобы образовались жёсткие профильные трубы – продольные вдоль печи каналы, по которым дым проходит из топливника в трубу. В таких трубчатых каналах обязательно устанавливают технологические лючки с заглушками. В приведённой на рисунке 150 модели контейнера по версии «Термофор» между дном контейнера и стенкой печи 1 оставлен зазор (щель) шириной 1–2 см так, чтобы дым 8 мог проникать в канал 18 по всему периметру дна контейнера, а пепел и сажа могли беспрепятственно сыпаться в топливник. Через эту щель можно также чистить каналы щёткой.

Печь работает следующим образом. Поток воздуха 14 поступает через зольник 7 и колосниковую решётку под закладку горящих дров. Дымовые газы 8 обтекают контейнер с камнями 10 и удаляются в дымовую трубу 5. Дымовые каналы (лабиринты теплообменники) 18, а точнее дымовые карманы, по своей конструкции здесь удачны тем, что препятствуют образованию циркуляционных потоков 9, поскольку «как пылесосы» отсасывают дым вверх по всему периметру печи. Поскольку в печи используется колосниковая решётка, то дымовые газы содержат большое количество горючих газов пиролиза (летучих), для дожигания которых подаётся вторичный воздух 12 по специальному трубчатому каналу 11 из зольника 7. Тяга в канале 11 возникает лишь при его нагреве и при наличии сопротивления решётки (при её завале горящими углями). Воздухозаборное отверстие 16 позволяет в любом режиме всегда подать воздух и на горение дров 17, и на

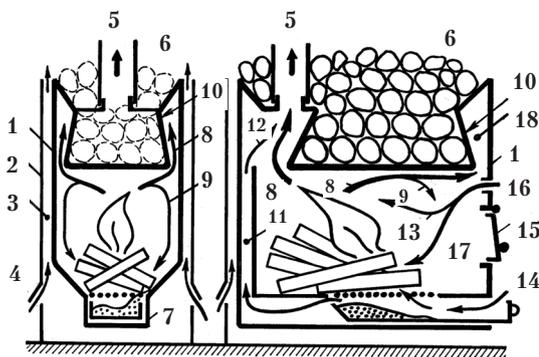


Рис. 150. Принципиальная схема металлической печи-каменки для сауны (версия «Термофор»): 1 – корпус печи, 2 – экран (кожух) печи, 3 – caloriferный промежуток (канал, пространство, шель), 4 – воздухозаборные отверстия (щели) calorифера, 5 – насадная труба стального дымохода, 6 – каменная засыпка (каменка), 7 – поддувало (зольник), перекрываемое колосниковой решёткой,

8 – главный (вытяжной) дымовой поток, 9 – циркуляционный дымовой поток, 10 – корпус каменки из толстой стали, 11 – стальная трубка для подачи подогретого вторичного воздуха из поддувала в зону дожигания перед дымовой трубой, 12 – вторичный воздух, 13 – вариант подачи вторичного воздуха, 14 – дверка поддувала, выполненная в виде вытаскивающегося совка (коробки, лотка) с золой, 15 – дверка топливника (может выполняться стеклянной), 16 – воздухозаборное отверстие (может выполнять роль глазка для контроля режима горения), 17 – «проваливающаяся струя при малых скоростях ввода воздуха, обеспечивающая горение дров, 18 – дымовой канал (карман).

дожигание летучих 13 с переводом решётки на режим глухого пода. Основным условием эффективного нагрева контейнера 10 является наличие длинного пламени, полностью охватывающего контейнер и нагревающего его именно лучистым теплом, а не только конвективным. Это требует подачи строго дозированного, причём минимально необходимого количества вторичного воздуха так, чтобы образовалось длинное пламя, может быть даже дымящее. Это чревато выделением сажи в каналах 18 и дымовой трубе, но такова уж цена эффективности нагрева камней на первом пламенном этапе горения дров. На втором этапе горения (сжигания углей), дающем основной вклад в нагрев камней, основную роль играют лучистые потоки от углей на корпус контейнера каменки. В этом случае конструкция печей по типу рисунка 150 уже не является оптимальной, поскольку большая часть лучистого тепла от углей идёт отнюдь не на контейнер, а на стенки печи 1.

Фирма «Кастор», например, исправляет этот недостаток установкой вдоль стенок, в первую очередь задней, экранов из жаростойкой стали, выполняющих роль жаровен, нагревающихся до высоких температур (докрасна) и излучающих тепло на дно контейнера (см. поз. 16 на рис. 117). Положительная роль каналов 18 (рис. 150) при сжигании углей снижается до минимума, поскольку несмотря на заполнение каналов горячим воздухом, лучистые потоки от раскалённой стенки контейнера

к охлаждающимся стенкам печи становятся определяющим видом теплопотерь контейнера.

### 5.7.13. Экранирование печей

Поскольку стенки топливников металлических печей нагреваются до температур обычно превышающих  $100^{\circ}\text{C}$ , основным механизмом теплоотдачи является лучистый в инфракрасной области. Поэтому, при чрезмерной мощности излучения в комнату топливник огораживают непрозрачным для инфракрасных лучей экраном – кожухом печи (см. поз. 2 на рис. 150, поз. 9 на рис. 149, поз. 11 на рис. 117). Экраны обычно изготавливают из металла, но могут быть сделаны из любого огнестойкого даже оптически прозрачного материала (термостойкого стекла), лишь бы он не пропускал инфракрасные лучи. Куда же в этом случае «пропадает» лучистый поток? Изменяется ли при этом теплоотдача печи? До каких же температур может нагреваться сам экран-кожух печи?

Прежде всего вспомним, что падающий на слой вещества лучистый поток  $I_0$  частично отражается  $I_{\text{отр}}$ , частично проходит внутрь слоя, где частично поглощается, а частично проходит через весь слой и выходит через него  $I_{\text{проп}}$  (рис. 151). Внутри мутного слоя излучение может изменять своё направление (рассеиваться), отражаясь от неоднородностей (частиц, сгустков), и выходить со всей тыльной стороны диффузно  $I_{\text{проп}}$  (пунктирная траектория). Процесс поглощения отличается от процесса рассеивания тем, что при поглощении излучения вещество слоя нагревается, а при рассеивании нет. Интенсивность направленного луча ослабевает как за счёт поглощения, так и за счёт рассеивания. Но поглощённое излучение из слоя не выходит, а рассеянное рано или поздно выйдет в виде ореола (как в случае света фар в тумане), в том числе и вперёд навстречу падающему излучению. В этом случае рассеянный поток вольётся в состав отражённого в виде диффузной составляющей. По сути отражённый свет есть частный случай рассеянного. В то же время, явление рассеяния увеличивает путь движения излучения в веществе, что повышает степень его поглощения.

Согласно закону сохранения энергии  $I_0 = I_{\text{отр}} + I_{\text{погл}} + I_{\text{проп}}$ , где  $I_0$ ,  $I_{\text{отр}}$ ,  $I_{\text{погл}}$  и  $I_{\text{проп}}$  – интенсивности падающего излучения, отражённого, поглощённого и пропущенного. Отсюда  $k_{\text{отр}} + k_{\text{погл}} + k_{\text{проп}} = 1$ , где  $k_{\text{отр}} = I_{\text{отр}}/I_0$  – коэффициент отражения,  $k_{\text{погл}} = I_{\text{погл}}/I_0$  – коэффициент поглощения,  $k_{\text{проп}} = I_{\text{проп}}/I_0$  – коэффициент пропускания. В дальнейшем для простоты будем считать  $I_{\text{проп}} = 0$ , хотя в ряде случаев для дачных бань могут оказаться интересными и прозрачные (в том числе и в видимой части спектра) экраны.

Далее, чтобы определиться с понятиями коэффициента поглощения, рассмотрим закрытую полость с одной и той же температурой всех стенок  $T$  и степенью черноты всех стенок  $\varepsilon=1$  (рис. 152). Теперь нанесём на один из участков внутренней поверхности полости пятно из материала (краски) со степенью черноты, отличной от единицы. Потоки лучистой энергии в полости как-то изменятся, перераспределятся, но потом в конце концов установятся на каком-то ином стационарном уровне. На пятно будет падать поток лучистой энергии абсолютно чёрного тела  $\sigma T^4$ , причём часть этого потока будет отражаться  $k_{отр}\sigma T^4$ , а часть поглощаться пятном  $k_{погл}\sigma T^4$ . В тоже время пятно само испускает поток лучистой энергии  $I_{соб}=\varepsilon\sigma T^4$  (см. рис. 151), где  $\varepsilon$  – степень черноты пятна. Тепловой баланс пятна будет достигнут при условии  $k_{погл}=\varepsilon$ . Таким образом, в условиях лучистого равновесия коэффициент поглощения  $k_{погл}$  равен степени черноты  $\varepsilon$ . Поскольку  $k_{отр}+k_{погл}=1$ , то  $k_{отр}$  будет равно  $k_{отр}=1-\varepsilon$ .

Теперь немного усложним модель: будем рассматривать баланс лучистого теплопереноса в зазоре между стенками с температурами  $T_1$  и  $T_2$  соответственно и с разными степенями черноты  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  (рис. 153). Тогда поток лучистой энергии слева направо будет равен  $I_1=\varepsilon_1\sigma T_1^4+I_2(1-\varepsilon_1)$ , а справа  $I_2=\varepsilon_2\sigma T_2^4+I_1(1-\varepsilon_2)$ . Преобразуя эти соотношения получаем  $\Delta I=I_1-I_2=\sigma(T_1^4-T_2^4)/(1/\varepsilon_1+1/\varepsilon_2-1)=\varepsilon_1\varepsilon_2\sigma(T_1^4-T_2^4)/(\varepsilon_1+\varepsilon_2-\varepsilon_1\varepsilon_2)$ .

Отсюда следует важные заключения. Во-первых, результирующий лучистый поток  $\Delta I=I_1-I_2$  (слева направо) увеличивается с ростом разницы температур стенок  $T_1$  и  $T_2$ . При  $T_1=T_2$  результирующий лучистый поток всегда равен нулю вне зависимости от оптических свойств поверхностей. Во-вторых, если обе поверхности стенок неотражающие (чёрные)  $\varepsilon_1=\varepsilon_2=1$ , то результирующий поток излучения равен  $\Delta I=\sigma(T_1^4-T_2^4)$ . В-третьих, если одна стенка неотражающая (чёрная), а вторая частично отражающая (серая)  $\varepsilon_2<1$ , то  $\Delta I=\varepsilon_2\sigma(T_1^4-T_2^4)$ , или если  $\varepsilon_1<1$ ,  $\varepsilon_2=1$ , то  $\Delta I=\varepsilon_1\sigma(T_1^4-T_2^4)$ . То есть, если одну из поверхностей сделать отражающей (блестящей)  $\varepsilon<<1$ ,

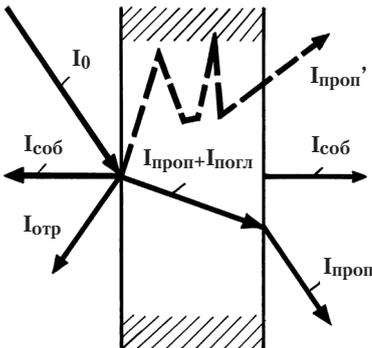


Рис. 151. Схема прохождения света – оптического излучения (в том числе инфракрасного) через слой вещества.  $I_0$  – исходное падающее излучение,  $I_{отр}$  – отражённое излучение (зеркально отраженное от поверхности и диффузно отраженное из глубины слоя),  $I_{проп}$  – излучение, пропущенное через слой без поглощения, преломляемое по законам оптики,  $I_{проп}'$  – излучение, пропущенное через слой без поглощения, но рассеянное на неоднородностях слоя (мути),  $I_{погл}$  – излучение, поглощённое слоем с выделением тепла,  $I_{соб}$  – собственное тепловое излучение слоя.

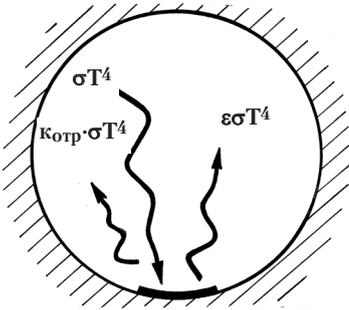


Рис. 152. Схема лучистых потоков в закрытой чёрной полости:  $\sigma T^4$  – мощность равновесного излучения абсолютно чёрной поверхности,  $\varepsilon$  – степень черноты пятна,  $K_{отр}$  – коэффициент отражения пятна.

то результирующий лучистый поток можно существенно снизить (например, в 50 раз при использовании полированной алюминиевой фольги со степенью отражения 98%). В-четвёртых, если обе стенки сделать отражающими с  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \ll 1$ , то  $\Delta I = \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) / 2$ , иными словами, результирующий лучистый поток снижается

в 2 раза по сравнению со случаем, когда отражающей является лишь одна стенка, что вполне логично (И.А. Прибытков, И.А. Левицкий, Теоретические основы теплотехники, М.: Металлургия, 2004 г.).

Всё это означает, что если мы хотим теплоизолировать топливник (то есть не выпускать лучистое тепло от стенки топливника в баню), то экран следует делать отражающим со стороны топливника. Но если мы хотим просто отгородиться от лучистого тепла, но тепло из топливника всё же вывести в помещение, то стенки топливника и экрана следует делать не-отражающими (чёрными).

Отражающие в инфракрасной области спектра экраны в виде зеркальных металлических поверхностей используются для сохранения тепла во многих областях техники: в термосах, в сосудах Дьюара для хранения жидкого азота, в космической теплозащитной технике. Для повышения эффективности лучистой теплозащиты можно применять многослойные экраны из множества металлических полированных пластин. Ситуация в общем-то абсолютно такая же, как в случае утепления стен отражающей изоляцией (см. раздел 3). Если поверхность экрана со стороны печи блестящая (отражающая, причём в инфракрасной области), то экран возвращает лучистое тепло на стенку топливника и играет роль теплозащиты (рис. 154). Кстати, зачастую в быту полагают, что любые слои теплоизоляции «отражают» тепло назад (хотя они фактически просто не пропускают тепло вперёд).

Современные металлические отопительные печи немислимы без применения экранов, которые зачастую называются просто кожухами. Кожухи могут быть и металлическими, и водоохлаждаемыми, и кирпичными. Некоторые дачники склонны полагать, что кожухи являются просто защитными или чисто декоративными элементами печей (заслоняющими неприглядную на вид обгорелую и неряшливо сваренную поверх-

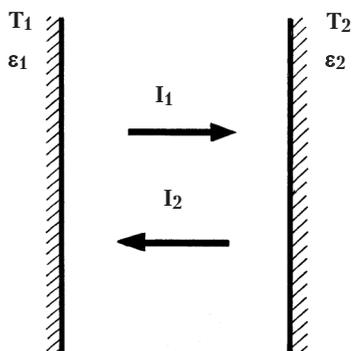


Рис. 153. Схема лучистого теплообмена в зазоре между двумя параллельными поверхностями.

ность топливника). Но экран печи – это не только (и не столько) облицовка. Экран – это важнейший элемент печи, управляющий теплоотдачей.

Действительно, при отсутствии экранов тепловое излучение беспрепятственно достигает стен бани, но любой экран уже препятствует этому. Если экран сделать неотражаемым (чёрным), то излучение от топливника полностью поглощается экраном. Экран нагревается, находящийся рядом с ним воздух тоже начинает нагреваться и подниматься вверх, унося с собой тепло с экранов в виде конвективного тепла. Теплопередающая система с развитой поверхностью горячих элементов для нагрева воздуха широко применяется во многих областях техники и называется калориферной (от слова «caloric», означающего «теплота»). Так, например, широко известные в прошлом печные изразцы выполнялись с вертикальными воздушными каналами так, чтобы изразцы помимо декоративной функции выполняли бы роль калориферной системы, повышающей теплоотдачу кирпичной печи (правда, незначительно). В случае экранов мы имеем дело тоже с калорифером – зазором с горячими стенками. Система экранов преобразует лучистое тепло в тепло воздуха, в отличие от жаровни, преобразующей наоборот, тепло воздуха в инфракрасное излучение. На рисунке 154 в качестве иллюстрации приведены тепловые балансы экранов, рассчитанные для случая слабого нагрева воздуха (то есть для невысоких экранов). Показано, что при температуре поверхности топливника печи  $400^{\circ}\text{C}$  достаточно двух экранов для снижения температуры до  $25^{\circ}\text{C}$ . При расчёте принята степень черноты экранов  $\epsilon=1$  и коэффициент кондуктивно-конвективной теплопередачи  $\alpha=22$  Вт/м<sup>2</sup>-град, отвечающий скорости движения воздуха 2 м/сек (см. раздел 5.7.3). При более высоких температурах поверхности печи потребуется большее число экранов, но если зазоры принудительно продувать вентилятором, то необходимое число экранов снижается. Большой интерес представляет случай, когда внешний экран охлаждается водой, то есть является котлом. В таком случае установка или удаление внутренних экранов регулирует скорость нагрева воды в котле.

Зазор (расстояние) между экранами должен выбираться из того расчёта, чтобы силы трения (вязкость) не препятствовали течению воздуха.

Зазор (расстояние) между экранами должен выбираться из того расчёта, чтобы силы трения (вязкость) не препятствовали течению воздуха.

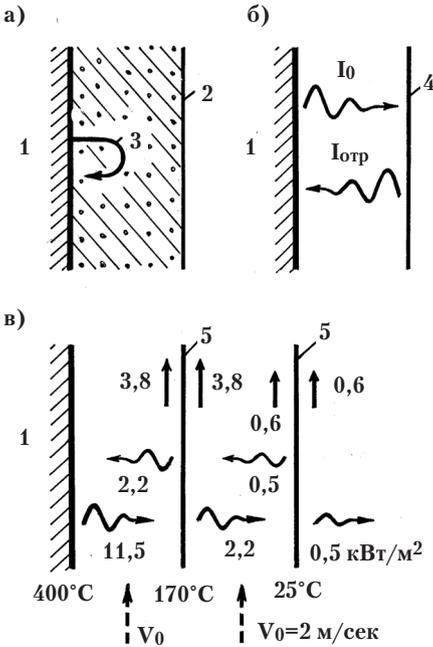


Рис. 154. Некоторые принципы защиты людей от лучистых потоков со стенки топливника металлической печи: а – теплоизоляция, б – отражение лучистого тепла, в – поглощение лучистого потока экранами. 1 – внешняя поверхность стенки топливника, 2 – слой низкопроводящего термостойкого материала, 3 – «отражающийся» кондуктивный поток тепла, 4 – отражающий экран, 5 – неотражающие (поглощающие инфракрасные лучи) экраны. Волнистые стрелки – лучистые потоки, прямые стрелки – потоки конвективного тепла, пунктирные стрелки – поток охлаждающего воздуха. Цифры при сплошных стрелках указывают расчётные мощности тепловых потоков в кВт/м<sup>2</sup> (в расчёте на 1 м<sup>2</sup> экрана), при пунктирных – скорость движения воздуха, при экранах – температуры экранов в нагретом состоянии. Так, на средний экран попадает 12 кВт/м<sup>2</sup> лучистого тепла (11,5 кВт/м<sup>2</sup> со стороны топливника; 0,5 кВт/м<sup>2</sup> со стороны внешнего экрана), из них по 3,8 кВт/м<sup>2</sup> снимается конвекцией с каждой стороны экрана и по 2,2 кВт/м<sup>2</sup> тепловым излучением в обе стороны.

Для свободноконвективных потоков при температуре экранов более 200°С величина зазора должна быть не менее 20–30 мм. При продуве зазора вентиляторами величину зазоров можно существенно уменьшать, а в местах местных газодинамических сопротивлений (поворотов, разворотов, в том числе связанных с использованием гофрированных листовых материалов, трубок, отверстий и т. п.) величину зазоров следует увеличивать. В случае свободноконвективных потоков в зазорах можно устанавливать задвижки, регулирующие скорость продува зазоров и, как следствие, температуру внешнего экрана (кожуха), что перекликается с принципом регулировки каменок на рис. 149. В связи с этим отметим, что очень высокие экраны у горячих поверхностей недопустимы, поскольку воздух в них нагревается до температуры экранов, и система конвективного теплоотбора перестаёт действовать. Высокие экраны надо разбивать на множество низких (с удалением горячего и вводом холодного воздуха).

Эксплуатация экранов связана с возможностью их периодического (эпизодического) перегрева и, как следствие, с коррозионным разрушением и нарушением внешнего вида. Так, оцинкованные листы покрываются белым налётом окиси цинка (что не столь опасно поскольку окись

цинка высокотоксична лишь в виде аэрозоля – дыма для лёгких), сталь покрывается налётом окалины, жаростойкие эмали отшелушиваются, а кремнийорганические (алюмоорганические и титанорганические) краски обгорают и трескаются. В первую очередь перегревы экранов вызываются недостаточным воздушным охлаждением: даже при больших расходах воздух в длинных зазорах нагревается значительно. Так что эффективность экранной теплоизоляции повышается с уменьшением высоты экрана (уменьшением размеров топливника) или уменьшением размеров локальных «пятен» нагрева топливника. Всё это в полной мере относится и к экранной защите, устанавливаемой внутри печи вдоль стенок топливника (поз. 16 на рис. 117). Внутри печи экраны играют одновременно роль жаровен, переизлучающих тепло, и роль теплоизоляции, отгораживающей (как зонтик) стенки печи от лучистых потоков от углей и пламени.

В идеальном случае воздух должен проходить в зазоре не просто вверх через весь вертикальный канал, постепенно прогреваясь до высоких температур и теряя способность снимать тепло с экранов. Крайне желательно было бы подавать холодный воздух в «каждую» точку зазора (то есть как можно более равномерно распределено ещё через многочисленные воздухоподающие устройства) и выводить горячий воздух также из «каждой» точки зазора (см. рис. 155а). Фактически эта схема эквивалентна спиральному воздухонагревателю с воздуходувкой (фену). При больших расходах воздуха и стенки топливника, и экран могут настолько охладиться, что лучистый поток от печи станет совсем не существенным. Этот случай фактически эквивалентен эффективному воздушному охлаждению, применяемому, в частности, для охлаждения двигателей внутреннего сгорания, корпусов мощных электроламп и т. п.

С другой стороны надо напомнить, что экраны у нагревательных приборов делают не только для защиты от теплового излучения, но и для забора воздуха именно с пола. Так вовсе не обязательно нагревать низ печи, достаточно у печи установить экран (с щелью у пола) высотой с печь.

В банной практике большой интерес представляет возможность регулировки мощности лучистых потоков. Так, например, при протопке бани, а также при её сушке по окончании банной процедуры очень важно, чтобы полы и стены прогревались инфракрасным излучением от печи. А во время приёма банной процедуры было бы желательно, чтобы инфракрасное излучение было направлено на потолок. Это может достигаться соответствующим распахиванием экранов в необходимые моменты времени. Конструкций, позволяющих делать это, много (рис. 155б, в, г), но используются они редко (по банальной причине, что такие печи для сухих саун не нужны, а русских банях непривычны).

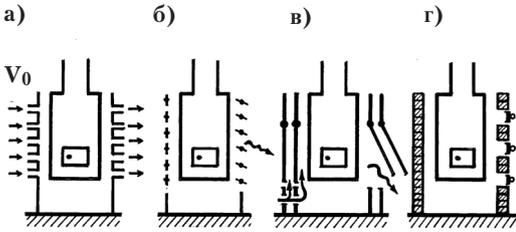


Рис. 155. Некоторые способы регулировки лучистой теплоотдачи: а – изменением скорости распределённой подачи воздуха  $V_0$  в caloriferный зазор, б – открытием жалюзи-экранов, в – распахиванием экрана, г – открытием лучков в кирпичной стенке-экране.

При создании металлических печей с целью увеличения теплоотдачи и коэффициента полезного действия часто стремятся увеличить при заданном объёме топливника его площадь (изнутри и снаружи) так, чтобы теплосъём был бы максимальным. Но дело в том, что в отличие от конвективного теплосъёма, действительно определяющегося площадью элементов, поток лучистого тепла не зависит от формы и площади неровностей поверхности поглотителя или излучателя, а определяется только угловыми соотношениями. В этом можно убедиться, исходя из следующих соображений. Представим, что мы хотим заменить ровную поверхность излучателя 1 на какую-нибудь иную неровную (скажем гофрированную) поверхность 2 той же температуры в стремлении увеличить площадь поверхности с целью повышения мощности инфракрасного излучения (рис. 156а). Составляя из этих поверхностей замкнутую полость (закрываем по пунктирным линиям), при равенстве температур и степеней черноты поверхностей всюду по всей полости мы должны получить состояние термодинамического равновесия. Это значит, что потоки  $I_1$  и  $I_2$  должны быть равны между собой. Иными словами, гофрирование не должно приводить к увеличению лучистого потока. Мощность излучения определяется не поверхностью излучающего чёрного тела, а проекцией этой поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению распространения излучения. Иными словами, для расчёта мощности излучения любую неровную поверхность необходимо заменять ровной, причём ориентированной перпендикулярно интересующему нас направлению излучения (закон Ламберта). Более того, наблюдатель, располагающийся в точке  $O$  (рис. 156б), фиксируя тепловой поток из телесного угла  $\alpha$ , не может отличить (ни по мощности, ни по спектральному составу) тепловые потоки от совершенно разных поочерёдно экспонируемых поверхностей 3 с одинаковой температурой, поскольку их проекции одни и те же и заполняют один и тот же телесный угол  $\alpha$ . И наоборот, излучение, исходящее из точки  $O$ , распространяясь во все стороны и уменьшаясь по интенсивности как квадрат расстояния, даёт одни и те же дозы тепла на любые возможные приёмные поверхности 3, заполняющие весь телесный угол  $\alpha$ . То есть удель-

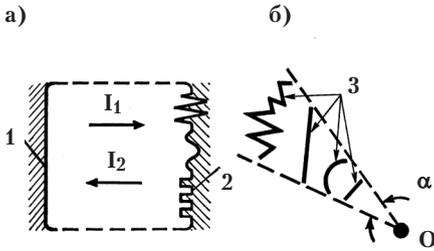


Рис. 156. Иллюстрация особенностей лучистой теплоотдачи: а – при равенстве температур лучистый поток  $I_1$  от плоской абсолютно чёрной поверхности 1 равен лучистому потоку  $I_2$  от любой профилированной абсолютно чёрной поверхности 2, б – лучистый поток в точку  $O$  из телесного угла  $\alpha$  не зависит от формы и месторасположения абсолютно чёрных поверхностей 3 (с одной температурой), расположенных в пределах телесного угла (или конуса).

ный тепловой поток, падающий на единицу площади приёмной поверхности, будет снижаться линейно как с увеличением квадрата расстояния от излучателя, так и с увеличением площади приёмной поверхности за счёт неровностей (гофрированности, шероховатости, волнистости и т. п.). В частности, это означает очевидный факт: общий лучистый поток от печи, исходящий во всю баню, не зависит от площади стен бани (в частности, за счёт их неровности, изогнутости, изломанности, угловатости и т. п.) или от факта установки в бане какой-нибудь дополнительной мебели, увеличивающей площадь тепловосприятости в бане. Точно так же внутри топливника общий лучистый поток от горящих углей на стенки топливника не будет зависеть от формы топливника. И опять-таки, наоборот, увеличение площади излучающих горячих стен бани (или поверхности стенок топливника) вовсе не означает, что лучистый поток со стен бани на тело человека (или со стенок топливника на дрова в печи) будет тоже увеличиваться. Так, при увеличении площади стен бани за счёт увеличения размеров бани стены оказываются дальше от тела человека (в среднем). А при увеличении площади стен бани за счёт изломанности, проекция поверхности стен на плоскость, перпендикулярную направлению излучения, остаётся неизменной, а поэтому поток лучистого тепла также остаётся неизменным. Физически это объясняется тем, что излучение из одних участков изломанных стен неминуемо будет попадать на другие части стен, а отнюдь не на тело человека.

В этой книге мы не имеем возможности углубляться в лучистую теорию бань. Законы лучистого теплообмена (и поверхностного, и особенно объёмного) весьма сложны и многогранны и зачастую затруднены для понимания бытовыми образами. Поэтому подчеркнём лишь, что все объекты в бане являются высокотемпературными, а отсюда все процессы следует рассматривать с обязательным учётом излучения, будь то нагрев тела человека или нагрев дров в печи.

Некоторые конкретные схемы экранированных печей приведены для иллюстрации на рисунке 157. Отметим, что внутренние жаротрубные си-

стемы воздушного теплосъёма, например, типа «Булерьян» (поз. 13 на рис. 157е и рис. 157з) или Бутакова (поз. 17 на рис. 157г и рис. 157ж), в состоянии существенно повысить теплоотдачу печей лишь при мощном принудительном (механическом) продуве жаровых труб воздухом (с получением слабонагретых потоков воздуха). Так, например, модель типа «Булерьян-Великан», тип 4 при объёме топки 0,2 м<sup>3</sup> имеет максимальную паспортную мощность горения всего 35 кВт, что соответствует удельному тепловому напряжению топливника всего 175 кВт/м<sup>3</sup> (если больше, то прогорают трубы), тогда как в обычных кирпичных печах этот показатель составляет в среднем 400 кВт/м<sup>3</sup>, а в обычных металлических печах достигает 1000 кВт/м<sup>3</sup> (что, впрочем, не умаляет декоративных достоинств «Булерьянов» и «Бутаковых»). Причиной прогаров труб 13 и 17 в «Булерьянах» и «Бутаковых» является низкая скорость продува и невозможность вывода лучистого тепла из жаровой трубы наружу. Для наглядности рассмотрим два варианта жаровой трубы: когда дымовые газы, например, с температурой 800°С находятся внутри трубы 18 (рис. 157ж) и когда дымовые газы находятся вне трубы 17 (рис. 157г и рис. 157ж) или 13 (рис. 157е и рис. 157з). В первом случае распределение температур по диаметру трубы 18 аналогично графику на рис. 67б, причём перепад температуры на стенке стальной трубы пренебрежительно мал всегда (не более нескольких градусов). На стенку жаровой трубы 18 изнутри поступает кондуктивный поток тепла от дымовых газов  $q = \alpha(800 - T_c)$ , численно иллюстрируемый прямой 19 на графике рис. 157и (где  $\alpha = 10$  Вт/м<sup>2</sup>·град – коэффициент кондуктивной теплопередачи,  $T_c$  – температура стенки жаровой трубы). Этот тепловой поток снимается с наружной стенки трубы 18 лучистым тепловым потоком  $\sigma T_c^4$ , а также кондуктивным потоком тепла  $\alpha T_c$ , что в сумме составляет величину, иллюстрируемую кривой 20 на рисунке 157и. Точка пересечения кривых 19 и 20 соответствует текущему значению температуры  $T_c$  стенки трубы 18. Во втором случае на стенку жаровой трубы 17 снаружи из дымовых газов поступает кондуктивный поток тепла  $q = \alpha(800 - T_c)$ , а также лучистый поток от углей ( $\sigma T_y^4 - \sigma T_c^4$ ), что в сумме при температуре углей  $T_y = 800^\circ\text{C}$  соответствует прямой 21 на графике рис. 157к. Этот поток тепла отводится в воздух внутри трубы кондуктивным потоком тепла  $\alpha T_c$  (см. прямую 22 на рис. 157к). Точка пересечения прямых 21 и 22 соответствует текущему значению температуры  $T_c$  стенки трубы 17.

Таким образом, внешние жаровые трубы 18 плохо нагреваются, но хорошо охлаждаются за счёт собственного теплового излучения. При характерном тепловом потоке 5 кВт/м<sup>2</sup> температура стенки трубы 18 составит 300°С (а при скоростях продува трубы дымовыми газами 5 м/сек тепловой поток составит 14 кВт/м<sup>2</sup> при температуре трубы 400°С). Так что

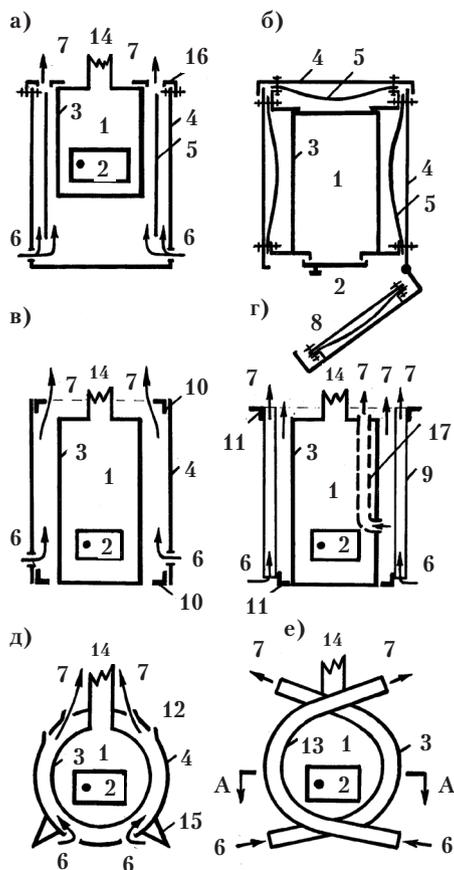
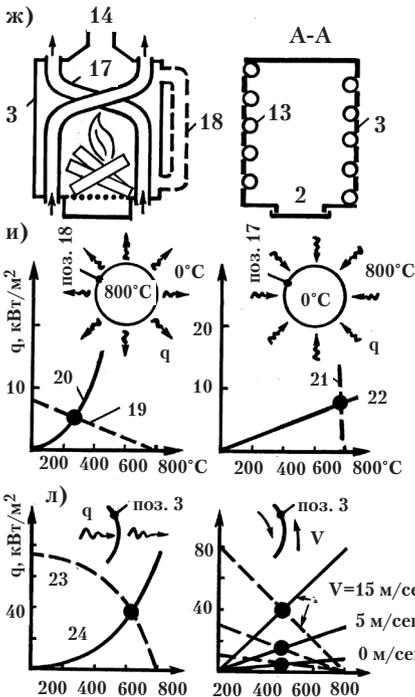


Рис. 157. Конструкция экранированных металлических печей: а – схема нержавеющей печи АТ-5 длительного горения с двойным экраном разработки опытного завода «Прогресс», вид спереди; б – то же, вид сверху; в – простейшая самодельная печь с одним экраном из стали, смонтированном на металлическом каркасе из уголков; г – простейшая самодельная печь с экраном из частоты вертикальных металлических труб (лучше с прямоугольной формой поперечного сечения); д – цилиндрическая печь горизонтальная с цилиндрическим экраном; е – цилиндрическая печь горизонтальная с экраном из согнутых труб (канадская модель); ж – прямоугольная печь с вертикальными воздухопродуваемыми жаровыми трубами («воздухогрейный котёл профессора Бутакова»); з – разрез печи рис. «е» (вид сверху), и – графический анализ тепловых потоков на стенки жаровой трубы 18 в режиме высокой температуры  $800^{\circ}\text{C}$  внутри трубы; к – то же для трубы 17 в режиме высокой температуры  $800^{\circ}\text{C}$  вне трубы; л – графический анализ лучистых тепловых потоков на стенку металлического топливника; м – графический анализ конвективно-кондуктивных потоков тепла на стенку металлического топливника (см. текст).

жаровые трубы малоэффективны для повышения мощности печи.

Что касается внутренних жаровых труб 17, то они, наоборот, хорошо нагреваются тепловым излучением от углей и пламени, но плохо охлаждаются, поскольку лучевой поток вывести из трубы невозможно. В результате, при характерном тепловом потоке  $8 \text{ кВт/м}^2$  стенка трубы нагревается до очень высокой температуры  $750^{\circ}\text{C}$ . Вывод тепла трубами 17 покажется эффективным в случае кирпичных печей без чугунных плит, поскольку

1 – топливник, 2 – дверка топливника, 3 – стенка топливника, 4 – внешний экран, кожух печи, 5 – промежуточный экран, 6 – отверстия для ввода холодного воздуха в межэкранное калориферное пространство, 7 – отверстия для вывода горячего воздуха из калориферного пространства, 8 – экран передней стороны печи распашной, 9 – частоты вертикальных труб (в том числе прямоугольного сечения), используемый в качестве экрана, 10 – каркас сварной из уголков, 11 – каркас из уголков для сборки системы труб сваркой, 12 – воздуховыводные отверстия в экране, 13 –



Температуры жаровых поверхностей  $T_c$ , °C

кирпичные стенки выпускают совсем мало тепла. Но для металлических печей такой тепловой поток очень мал, поскольку металлические стенки топливника выделяют обычно до (40–60) кВт/м<sup>2</sup>. А вот при скоростях продува трубы воздухом 5 м/сек (36 м<sup>3</sup>/час через каждую трубу внутренним диаметром 50 мм) тепловой поток возрастает до 25 кВт/м<sup>2</sup>, хотя температура стенки снижается при этом незначительно (до 700°С). Ясно, что постоянная эксплуатация печи со столь высокими температурами труб 17 связана с прогарами, а поэтому мощность печей с жаровыми трубами 17 специально ограничивается.

Всё это означает, что экранирование от лучистых потоков может мыслиться не только снаружи печи, но и внутри печи. Однако при этом возникают проблемы отвода тепла от экранов и они перегреваются, отдавая в конце концов энергию только в виде излучения на внешние стенки. Тем не менее, такие внутренние экраны способны перераспределять лучистые потоки внутри печи, направляя их в большем количестве на дрова, стенки контейнера каменки или бака с водой (поз. 16 на рис. 117).

В то же время обычные стенки топливников 3 являются очень эффективными нагревателями воздуха. Так, при лучистом нагреве стенок 23 и лучистом же охлаждении их 24 (рис. 157л) тепловой поток составит 40 кВт/м<sup>2</sup>

- з) система согнутых труб, сваренных с листовыми вставками в единый корпус-экран печи, 14 – дымовая труба, 15 – ножки печи, 16 – декоративная металлическая перфорированная наклад-ка, 17 – внутренние жаровые воздухо-продуваемые (свободной конвекцией) трубы обычно с внутренним диаметром 50 мм, 18 – внешние жаровые трубы, 19 – мощность кондуктивного теплового потока изнутри трубы 18 на стенку, 20 – мощность лучистого потока  $\sigma T_c^4$  со стенки жаровой трубы 18 наружу, 21 – мощность лучистого потока снаружи на внешнюю стенку жаровой трубы 17, 22 – мощность кондуктивного отвода тепла с трубы 17 внутрь, 23 – лучистый тепловой поток изнутри топливника на стенку топливника ( $\sigma T_y^4 - \sigma T_c^4$ ), где  $T_y$  – температура углей или пламени, 24 – лучистый тепловой поток  $\sigma T_c^4$  со стенки топливника наружу.
- м)

кирпичные стенки выпускают совсем мало тепла. Но для металлических печей такой тепловой поток очень мал, поскольку металлические

при температуре стенки  $600^{\circ}\text{C}$ . Конвективно-кондуктивная теплопередача от дымовых газов к стенкам, имеющим столь высокую температуру, очень низка. Но если чисто гипотетически предположить, что тепловое излучение в природе совсем не существует, то тепловой баланс стенки топливника металлической печи складывался бы из притока тепла кондуктивно-конвективными механизмами (пунктирные прямые на рис. 157м для скоростей принудительного движения газа  $0,5$  и  $15$  м/сек) и оттока тепла теми же кондуктивно-конвективными механизмами (сплошные прямые для тех же скоростей движения воздуха). Точки пересечения пунктирных и сплошных прямых на рис. 157м показывают, что характерные температуры топливников составляли бы  $400^{\circ}\text{C}$ , причём уровни передачи тепла увеличиваются с  $4$  кВт/м<sup>2</sup> при нулевой скорости принудительного обдува (при свободной конвекции) до  $40$  кВт/м<sup>2</sup> при ураганном обдуве  $15$  м/сек. Ясно, что в действительности при  $400^{\circ}\text{C}$  явления лучистого переноса изменяет всю гипотетически рассмотренную выше картину теплообмена.

Таким образом, главным правилом конструирования мощных («пламенных») в отличие от «телющих») металлических печей является обеспечение беспрепятственного доступа лучистого тепла от углей и пламени на поверхности теплосъёмных элементов (в том числе и на внутренние поверхности топливника и контейнера для камней), эффективно охлаждаемые лучистым образом и/или водой и/или иным холодным высокотеплопроводным веществом (кирпичом, каменными засыпками и т. п.), но ни в коем случае только ультранизкотеплопроводным воздухом (даже холодным и быстро движущимся). Охлаждение внешних стенок топливников воздухом может быть только дополнительным средством теплосъёма. Иными словами, при анализе любых видов печей прежде всего надо отслеживать, куда и как перераспределяется лучистое тепло.

Нарушения этого правила встречаются часто, конечно, с благими намерениями, а значит специально, но с неправильной осознанностью. Так, например, применяя колосниковую решётку, обеспечивают (при большом количестве углей) недостаток кислорода для горения дров и вследствие этого получают жёлтое высокое пламя. При этом разумно располагают ввод вторичного воздуха у хайла (входа в трубу) так, чтобы дожигание раскалённых частиц сажи происходило уже в трубе и не приводило бы к сокращению высоты пламени в топливнике. Тем самым реализуется режим пламенной печи, в которой лучистые потоки намного превышают конвективные потоки тепла. Поэтому лучистое тепло надо просто-напросто пропускать на интенсивно охлаждаемые стенки топливника или змеевика с водой. Но в целях «интенсификации» теплообмена порой в топливнике устанавливают дополнительные дымообороты и змеевики, продуваемые потоками воздуха, увеличивающие некую «площадь контакта». При этом