

Рис. 59. Модельные варианты взаимного монтажа пароизоляции и обшивки (вагонки). 1 – открываемые продухи консервирующей вентиляции, 2 – потоки вентиляционного воздуха (ветра), 3 – ветроизоляция (картон, пергамин, микроперфорированная плёнка), 4 – утеплитель, 5 – отражающая пароизоляция (алюминиевая бумага, полированная фольга), 6 – рейка крепёжная (прокладка, штапик), 7 – ветроизоляция (супердиффузионная мембрана), 8 – плотноуложенная вагонка, 9 – неотражающая пароизоляция (неполированная фольга, полиэтиленовая плёнка), 10 – вагонка, уложенная со щелями.

механической обработки древесины и сборки конструкций. Так что даже очень небольшие щели достаточны для вывода того пара, который выходит из древесины при сушке. Но беда как раз в том, что пар выходит из древесины в обычных условиях очень медленно. Так, вышерассмотренная пароизолированная балка толщиной 0,1 м будет сохнуть через непосредственно примыкающий каналный продух  $1 \times 1 \text{ см}^2$  (см. рис. 58а) от влажности 40% до 30% при температуре  $20^\circ\text{C}$  в течение  $10^4$  часов (более года!). Но если продух охватывает всю балку (в виде щели), то продолжительность сушки сократится до 500 часов (рис. 58б). Как раз поэтому в начале этого раздела рекомендовалось организовать беспрепятственное проветривание всего подполья в целом. Ускоренно сохнут также балки с внутренними полостями-каналами (продольными и поперечными, расверленные, продолбленные или сколоченные), не ухудшающие механические свойства балок на изгиб (рис. 58в). Все эти чисто теоретические модельные соображения в первую очередь относятся к «гидроизолированным» (например, битумной мастикой или масляной краской) и пароизолированным конструкциям, которые даже при незначительных повреждениях покрытия способны впитать много воды, но потом не способны высохнуть (из-за наличия паробарьера) очень длительное время (см. раздел 3). Отсюда следует высокая перспективность микроперфорированных гидроизолирующих материалов («дышащих» типа «Тайвек») для защиты и консервирующей вентиляции балок банных полов. На практике гидроизоляцию 5 или 6 лучше не применять вообще.

В заключение в качестве иного примера рассмотрим целесообразность организации зазора в стенах бани между пароизоляцией и декоративной облицовкой, в частности, вагонкой (рис. 59). Если пароизоляция

изготавливается из блестящей (полированной) алюминиевой фольги, алюминиевой бумаги или ткани, и её планируют использовать не только как пароизоляцию, но и тепловую отражательную изоляцию, то вопрос зазор – зазор необходим, причём в виде воздухонепродуваемой воздушной прослойки. В случае, если облицовка (вагонка) в ходе банной процедуры (или в результате протечек) увлажняется (то ли водой, то ли паровым конденсатом), то необходимо предусматривать влагостойкость ветроизоляции 7 и вентилируемость зазора по окончании банной процедуры (рис. 59а).

Если же пароизоляция не является отражательной (пергамин, полиэтиленовая плёнка, обычная алюминиевая фольга), то в случае гарантированного отсутствия увлажнений пригодны любые решения: либо вагонка набивается прямо на пароизоляцию (именно так чаще всего изготавливаются российские сэндвич-панели разборных домиков для сухих саун (рис. 59б)), либо на пароизоляцию сначала набивают рейки для организации зазора, а потом на рейки набивается вагонка (рис. 59в). Консервирующая вентиляция заведомо сухих зазоров, естественно, не требуется. Поэтому зазор лучше делать герметичным (непродуваемым) и использовать в качестве утепляющей воздушной прослойки.

Если же вагонка заведомо увлажняется при мытье, а тем более увлажняется полость зазора, то есть две возможности. Во-первых, можно сделать облицовку из вагонки полностью продуваемой, то есть в виде декоративной решётки или многощелевого щита (рис. 59г, д). При этом фактически безразлично, есть ли зазор или нет – область примыкания вагонки к пароизоляции находится в непосредственной близости к вентилируемым продухам между досками (но лучше, конечно, если бы зазор всё-таки был, хотя бы в виде щели или каналов-пропилов). Ни о какой теплоизолирующей способности зазора или слоя вагонки в этом случае говорить не приходится. Во-вторых, можно сделать зазор так, чтобы он сохранял теплоизолирующую способность как прослойка неподвижного воздуха. В таком случае он должен быть, как минимум, ветроизолированным, но паропроницаемым, а лучше продуваемым после окончания банной процедуры (рис. 59а).

Отметим, что консервирующая сушка зазоров за счёт влажного банного воздуха малоэффективна, поэтому в зазор целесообразно вводить сухой наружный воздух. Это существенно усложняет конструкцию банных стен, поскольку необходимо каким-то образом проходить через слои ветропароизоляции (рис. 59а). Всё это говорит о том, что все проблемные строения лучше оставлять между протопками открытыми ветровым напорам, более того, делать их особопродуваемыми так, чтобы можно было бы сушить стены через вентотверстия во внутренних сторонах стен, в том

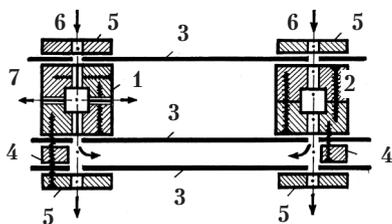


Рис. 60. Модельный пример быстропрсушивающегося каркаса на основе полых стоек (балок). 1 – клеёный, а также, может быть, стянутый саморезами (шурупами, болтовыми соединениями) брус с внутренней продольной полостью (каналом), собранный из четырёх брусков с выбранными четвертями, 2 – тоже, но собранный из двух брусков с выемкой, 3 – изоляционные слои, 4 – прокладки (в том числе попеременно с разных сторон вентканала), 5 – прижимные планки, 6 – сквозной вентканал, 7 – распределительные каналы. Стрелками показаны направления движения вентиляционного воздуха. Вентканалы 6 могут соединяться и заглушаться на время банной процедуры.

числе попеременно с разных сторон вентканала), 5 – прижимные планки, 6 – сквозной вентканал, 7 – распределительные каналы. Стрелками показаны направления движения вентиляционного воздуха. Вентканалы 6 могут соединяться и заглушаться на время банной процедуры.

числе, предназначенные для общеобменной вентиляции. Очень удобными для организации проветривания воздушных зазоров и полостей (прослоек), в том числе заполняемых утеплителем, могут оказаться полые клеёные (и/или стянутые саморезами) слабodeформирующиеся деревянные стойки (короба), балки, лаги с внутренними продольными (осевыми) каналами, продуваемыми ветром (рис. 60). Можно просверливать по месту отверстия в полых стойках, в том числе, непосредственно через изоляционные и декоративные слои. Пустотелые стойки и балки легко изготавливаются современным инструментом из строганных досок или брусков с выбранными четвертями и после нанесения водостойкого клея стягиваются струбцинами. Попутно отметим, что, к сожалению, весь накопленный финнами опыт работы с элитной древесиной для современных сухих саун явно недостаточен для создания надёжных консервирующих систем автономных каркасных паровых бань с протекающими полами и переувлажняемыми стенами. Достаточно отметить, что даже в части деревянной банной мебели (полков, лавок, табуретов и т.п.) до сих пор нет общепринятых быстропрсушающих (или ненамокаемых) конструкций, особенно в местах соприкосновения элементов (например, досок плашмя), в том числе в узлах крепления к стенам (не говоря уже о протекающих полах).

Приступая к конструированию системы каналов консервирующей вентиляцией дачник должен чётко сформулировать для себя вопрос: нужна ли ему эта вентиляция, а если нужна, то для чего. Подавляющее большинство дачников вообще её не предусматривает, кто по незнанию, кто, надеясь на надёжность кровли и пароизоляции, на качество антисептической обработки, кто заранее планируя перебрать мебель, полы и обшивку при появлении признаков гниения. Кое-кто ради своего спокойствия просто-напросто приобретёт вместо обычного рубероида и полиэтиленовой плёнки современные материалы, в первую очередь ги-

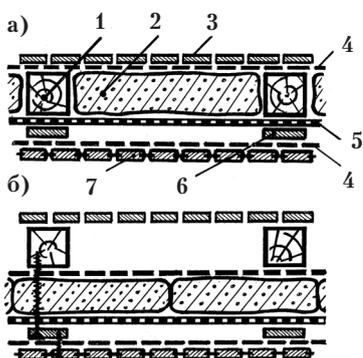
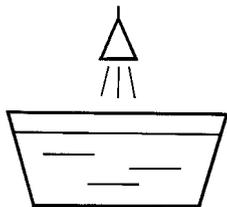


Рис. 16. Обычная конструкция многослойной утепленной стены и конструкция с быстропросушивающимися стойками, балками (венцами). 1 – стойки, лаги, балки, 2 – утеплитель, 3 – облицовка внешняя, 4 – ветрозащита, 5 – парозащита, 6 – рейки, 7 – внутренняя облицовка.

дроизолирующие (но пропускающие пар) и ветрозащитные (но пропускающие воздух), для ускоренной просушки за счёт диффузии и продува. Решений может быть множество в зависимости от конструкции самого сооружения («коробки») бани. Но если дачник хочет подольше сохранить достойный интерьер элитной бани и/или быстро устранять последствия намокания полов и полков при мойке или увлажнения стен от протечек, то он должен в первую очередь определить те элементы строения, которые он будет вентилировать особенно эффективно, вплоть до обдува электровентиляторами. Так, например, если поставить задачу защитить основополагающие несущие элементы (стойки каркаса и балки перекрытий), то целесообразно вынести стойки и балки из изолирующего модуля и сделать их обдуваемыми снаружи ветром (рис. 61б). Но если баня находится на берегу реки и постоянно затапливается весенними половодьями, то дачнику следует подумать об отказе от водопоглощающих утеплителей или от самой каркасной (панельной) конструкции вообще в пользу бревенчатой (брусовой).

В любом случае, дачник не должен забывать, что общеобменная вентиляция базируется в основном на гравитационных перепадах давления, а консервирующая вентиляция – в основном на перепадах давления, образованных ветровыми напорами. И если общеобменная вентиляция способна быстро высушить лужи на полах и полках, то сушка древесины в порах (внутри досок и балок) протекает очень медленно (а значит за счёт длительного проветривания) точно так, как сушка дров в поленнице – за счёт легкопродуваемых зазоров (продухов).

Строитель сначала делает, а потом думает, а дачник сначала думает, а затем ничего не делает.



## 5. Климатический (отопительный) модуль

Климатический модуль – самый любимый узел знатоков бань. Именно он делает баню «баней», а парилку «парилкой». Климатический модуль включает в себя отопительный и увлажнительный узлы, порой накрепко связанные друг с другом. Причём именно отопительный (печной) узел чаще всего формирует в народе особые и наиболее устойчивые банные представления (чаще всего связанные с наличием каменки) и в то же время рождает трудноразрешимые вопросы (связанные с оптимизацией конструкции).

### 5.1. Тепловой баланс строения

Выбор типа отопительного прибора обычно начинается с оценки необходимой мощности теплового источника. Такая оценка, как правило, производится в быту крайне ориентировочно, интуитивно (то есть на основе личного опыта или «мнения соседа»), на уровне житейских понятий «хватит», «достаточно», «маловато». Действительно, редко кто рассчитывает в деталях теплопотери будущей дачной постройки и теплоотдачу задумываемой печи. Только сауны заводского изготовления порой имеют хоть какие-нибудь паспортные характеристики, да и то с учётом многочисленных поправок с погрешностью порой в два-три раза. Чаще всего обеспеченные дачники принимают решение «с запасом», чтобы потом «не жалеть», то есть устанавливают печь наиболее крупного размера, которая бы «влезла и не очень мешала».

Детальные численные расчёты в составе проектов действительно целесообразны лишь в случае ответственных проектов дорогостоящих бань, особенно создаваемых подрядчиком «под ключ». В случае рядовых бань достаточно знать лишь приблизительный уровень необходимой мощности нагрева (для правильной покупки или заказа подходящей мо-

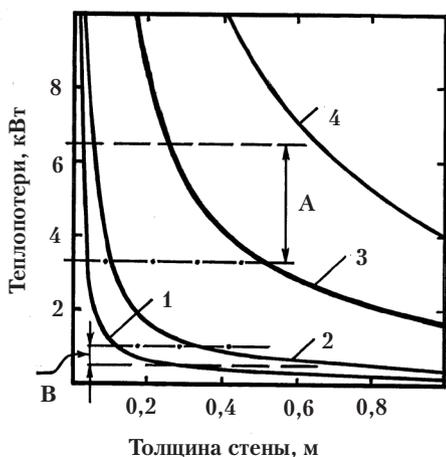


Рис. 62. Кондуктивные теплопотери при различных толщинах ограждающих конструкций площадью 30 м<sup>2</sup>. 1 – эффективный утеплитель (пенопласт, минвата), 2 – древесина, 3 – кирпич, 4 – бетон, А – интервал теплопотерь обычных дачных строений (древесина 5–10 см, кирпич 25–50 см, пенопласт 20–40 мм), В – интервал теплопотерь ограждающих конструкций по СНиП23-02-2003 (древесина не менее 30 см, кирпич не менее 140 см, пенопласт не менее 100 мм). Расчет для зимы.

дели печи), а также уметь сопоставить влияние различных конструктивных особенностей на теплофизические свойства печей и зданий.

Ясно, что необходимая мощность печи определяется в первую очередь характеристиками здания. Примем для оценок объём бани условно равным 10 м<sup>3</sup> при площади ограждающих конструкций S=30 м<sup>2</sup> (коробка 2×2×2,5 м). Предположим, что топим баню зимой при температуре наружного воздуха минус 20°С, а летом – при температуре плюс 20°С, температуру внутри бани доводим до 100°С у потолка и до 20°С у пола. Температура 100°С, может быть, кому-нибудь покажется слишком высокой для паровых бань, но тем не менее она вполне достижима даже при кирпичных печах с чугунными плитами, более того, вполне характерна для нынешних дачных бань с металлическими печами. Теплофизические характеристики здания будут определяться при этом материалом стен, полов и потолков.

Предварительную оценку будем вести крайне ориентировочно по тепловому сопротивлению основного утеплительного материала ограждающего модуля без учёта пограничных слоёв, то есть будем считать, что температура поверхности слоя утепляющего материала равна температурам окружающего их воздуха. После выбора конкретной конструкции (стен, окон, дверей и т. п.) можно провести более детальный поверочный (проверочный) расчёт для подтверждения правильности (а главное, разумности) выбранного решения. Настоящая книга содержит все необходимые для этого сведения, применительно к методике СП 23-101-2000.

Примем для оценок, что кондуктивные теплопотери через элементы ограждающей конструкции (стены, пол и потолок) в первом приближении определяются выражением  $Q = \sum S_i \lambda_i \Delta T_i / \delta_i$ , где  $S_i$  – площадь,  $\lambda_i$  – теплопроводность,  $\Delta T_i$  – перепад температур,  $\delta_i$  – толщина каждого элемента

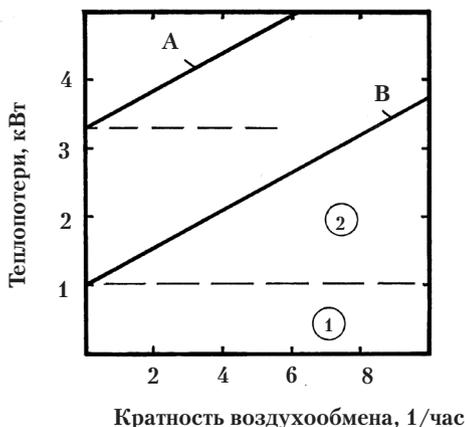


Рис. 63. Сумма кондуктивных и конвективных теплопотерь в зависимости от кратности воздухообмена в бане объёмом  $10 \text{ м}^3$ . 1 – вклад кондуктивных теплопотерь, 2 – вклад конвективных теплопотерь, А – суммарные теплопотери бани с обычными дачными стенами (см. нижнее штрихпунктирное значение интервала А на рис. 62), В – суммарные теплопотери бани с утеплёнными стенами по СНиП23-02-2003, пенопласт 100 мм (см. верхнее штрихпунктирное значение интервала В на рис. 62).

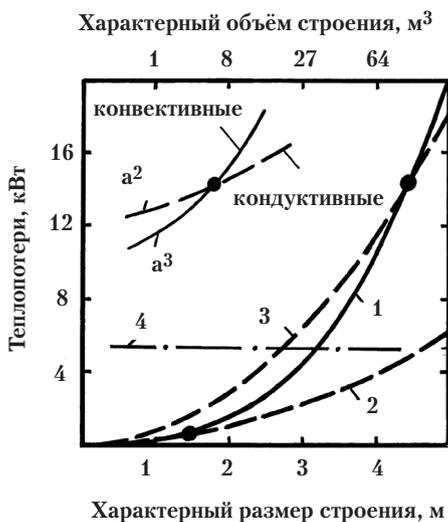
ограждающей конструкции. Для упрощения положим, что окон и дверей даже нет, что толщина и теплопроводность всех элементов ограждающих конструкций одинакова, то есть полы, потолки и стены бани одинаковы. В этом случае получаем  $Q = S \lambda \Delta T_0 / \delta$ , где  $\Delta T_0$  – средний перепад температур на стенах, равный  $80^\circ\text{C}$  зимой и  $40^\circ\text{C}$  летом. Отсюда следует, что слой эффективного утеплителя (например, пенопласта) толщиной 100 мм (соответствующий современному отечественному и европейскому, условно названному нами «В», уровню теплопотерь стен жилых зданий с термическим сопротивлением не менее  $2 \text{ м}^2\cdot\text{град}/\text{Вт}$ ) заменяет в плане теплоизоляции стену из бруса толщиной 30 см и из кирпича – 140 см (рис. 62). При таких стенах, полах и потолках на обогрев бани рассматриваемого размера потребуется всего порядка 1 кВт даже зимой, что может обеспечить обычный бытовой электровоздухонагреватель. При обычной толщине стен дачных и банных строений, соответствующих условному названию уровня «А» (утеплитель 40 мм или брус 10 см или кирпич 50 см), на обогрев бани рассматриваемых размеров потребуется уже 3–4 кВт зимой и 1,5–2 кВт летом.

Помимо кондуктивных теплопотерь через стены имеются конвективные теплопотери на нагрев вентиляционного воздуха, увеличивающиеся пропорционально кратности воздухообмена (рис. 63). Количественный вклад конвективных теплопотерь не зависит от материала стен и уровня кондуктивных теплопотерь, но относительный вклад в тепловом балансе увеличивается при утеплении стен. Так, при нормативном термическом сопротивлении стен по СНиП23-02-2003 вклад конвективной составляющей начинает превышать вклад кондуктивной составляющей теплопотерь при кратности теплообмена более 4 раз в час (прямая В). При обыч-

ных бревенчатых (брусовых) стенах толщиной 10 см вклад конвективной составляющей численно остаётся тем же, но относительный вклад становится незначительным (прямая А). Так или иначе, при высокой кратности воздухообмена мощность нагрева порядка 1 кВт уже окажется явно недостаточной даже при сколь угодно хорошо утеплённых стенах и при сколь угодно сниженных теплотерях через окна и двери.

В целом, из рисунков 62 и 63 видно, что для поддержания выбранного температурного режима в бане рассматриваемого размера необходима номинальная мощность теплового источника не менее (2–3) кВт в банях с эффективными утеплителем и (3–5) кВт в брусовых банях. Такой уровень мощности нагрева труднодостижим с помощью цельнокирпичных печей (см. раздел 5.3).

Что касается иных размеров бань, то необходимо отметить следующую важную закономерность (рис. 64). Кондуктивные теплотери через стены пропорциональны площади ограждающих конструкций, то есть в случае условно кубической формы строения пропорциональны  $6a^2\lambda$ , где  $a$  – размер грани куба,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стен. Конвективные потери на нагрев вентиляционного воздуха при фиксированной кратности воздухообмена пропорциональны объёму бани  $a^3$ . То есть соотношение вкладов конвективной и кондуктивной составляющих теплообмена пропорционально  $a^3/\lambda a^2 = a/\lambda$ . Это значит, что при больших  $\lambda$  и малых размерах бань (малых объёмах) всегда преоблада-



емых размерах бань (малых объёмах) всегда преоблада-

Рис. 64. Уровень теплотери в зависимости от характерного размера строения ( $a$ ) при фиксированной кратности воздухообмена 6 раз в час. 1 – конвективные теплотери при фиксированной кратности вентиляции, пропорциональные объёму строения  $a^3$ , 2 и 3 – кондуктивные теплотери через стены из пенопласта (2) и бруса (3) толщиной 100 мм, пропорциональные площади ограждающих конструкций  $6a^2$ . Сверху слева показан качественный характер хода кривых  $x=a^2$  и  $x=a^3$

(отвечающих ходу кондуктивных и конвективных теплотери), имеющих точку пересечения (обозначенную большой чёрной точкой) Прямая 4 отвечает конвективным теплотерям, отвечающим фиксированной скорости вентиляции 200 м<sup>3</sup>/час.

ют кондуктивные теплопотери, а при  $\lambda$  малых и больших размерах бань – конвективные.

Так, если кратность воздухообмена составляет  $6 \text{ час}^{-1}$  и если стены утеплены в соответствии со СНиП23-02-2003, то конвективные теплопотери начинают преобладать при объёмах бани уже  $2\text{--}3 \text{ м}^3$  и выше (рис. 64). Это значит, что при очень «тёплых стенах» мощность теплового источника должна быть пропорциональна объёму помещения, что и рекомендуется финскими компаниями для сухих саун (с некоторыми поправками). Но если стены не очень «тёплые» (например, изготовлены из бруса толщиной 10 см), то конвективные теплопотери начинают преобладать лишь при очень больших объёмах бань более  $100 \text{ м}^3$ . То есть, если стены не очень «тёплые», то мощность теплового источника должна быть пропорциональна площади ограждающих конструкций бани.

Конечно, фиксированная кратность воздухообмена на уровне  $(5\text{--}6) \text{ час}^{-1}$  в случае бань большого размера оправдана лишь для сухих многоместных саун с высокой «производительностью» по потоку людей и с «плотной установкой» людей в сауне из расчёта  $(3\text{--}5) \text{ м}^3$  на одного человека. В представительских саунах для немногочисленных посетителей достаточна вентиляция  $(20\text{--}30) \text{ м}^3/\text{час}$  на одного человека. В этом случае ситуация изменяется в корне: при фиксированном проходном сечении вентотверстий, то есть при фиксированной скорости воздухообмена (например,  $200 \text{ м}^3/\text{час}$  на семь-десять человек) в маленьких банях получается высокая кратность вентиляции, а в больших – малая (кривая 4 на рис. 64). Вклад конвективной составляющей при этом может стать преобладающим лишь при малых размерах бань. Этот факт используется в русских паровых банях: паровой режим легко реализуется в крупных банных помещениях (объёмом более  $50 \text{ м}^3$ ), а в малых банных помещениях (объёмом  $10 \text{ м}^3$  и менее) легче реализуется сухой режим.

В то же время если закрыть вентиляционные отверстия вообще, то паровой режим легче получить как раз в малых банях. Все эти «противоречия», естественно, вызваны неоправданной фиксацией /при численном анализе/ того или иного параметра вентиляции и часто приводят к путанице в популярной банной литературе.

## 5.2. Тепловая инерция строения

В предыдущем разделе мы оценили основные теплопотери при уже протопленной бане. Но ведь затапливают баню в холодном состоянии, и чтобы её нагреть, необходимы теплотраты, которые также обеспечива-

ются отопительным прибором (печью). Учитывая теплоёмкости различных материалов, оценим, сколько надо тепла, чтобы прогреть 30 м<sup>2</sup> стен с условными уровнями теплозащиты А и В (см. рис. 62):

Уровень теплозащиты	Материал стен	Теплозатраты, кВт×час
Обычный уровень («А») с теплопотерями (4–6) кВт через ограждающие конструкции 30 м <sup>2</sup>	Кирпич 500 мм	258
	Брус 100 мм	38
	Утеплитель 40 мм:	
	– без облицовки	1,8
	– облицовка сталью 0,55 мм	3,2
	– облицовка вагонкой 10 мм	9,4
	– облицовка вагонкой 20 мм	17,0
Перспективный уровень («В») с теплопотерями (0,5–1,0) кВт	Кирпич 1400 мм	722
	Брус 300 мм	114
	Утеплитель 100 мм:	
	– без облицовки	4,5
	– облицовка сталью 0,55 мм	5,9
	– облицовка вагонкой 10 мм	12,1
	– облицовка вагонкой 20 мм	19,7

Для удобства оценок теплозатраты представлены в единицах кВт×час. Если мощность теплового источника составляет, например, 1 кВт (уровень обычного бытового электрообогревателя), то «коробка» рассматриваемого размера, обитая изнутри утеплителем 40 мм и вагонкой 10 мм, нагреется за 10 часов. Во-первых, бросается в глаза весьма неожиданный результат: чем теплее здание из кирпича (или бруса), тем больше тепла требуется на его протопку. Действительно, чем толще стены, тем они более тёплые (в смысле малости кондуктивных потерь за счёт теплопроводности), но в то же время они более массивные и потому требуют больше тепла на первичный прогрев. Если имеется возможность долгого (днями и даже неделями) постепенного прогрева помещения с толстыми стенами (например, землянки), то потом для поддержания высокой температуры в прогретой бане потребуется совсем немного тепла (как, например, в пещерах, землянках, метро). Так что для постоянно отапливаемых жилых зданий высокая теплоёмкость стен скорее является плюсом, чем минусом, поскольку никак не влияет на теплозатраты, но обеспечивает инерционную стабильность температуры в помещениях. В периодически или эпизодически протапливаемых банях более удобны малотеплоёмкие стены, позволяющие быстро прогревать помещение.

Во-вторых, из этих данных можно было бы предположить, что современный утеплитель позволяет совершенно по-революционному подойти к проблеме дачных бань именно из-за рекордно низкой удельной теплоёмкости стен из утеплителя с тонкой облицовкой и одновременно низкой теплопроводностью. Тем не менее это не так. К сожалению, теплоёмкость стен даже на столь низком уровне (2–20) кВт·час является весьма высокой в том смысле, что тепловые затраты на нагрев воды для мытья всё равно остаются меньшими, чем теплотраты на нагрев помещения:

Нагреваемый объект	Таблица 14 Теплотраты, кВт×час
Кирпичная печь среднего размера 1000 кг до 400°С внутри и до 100°С снаружи	60
Металлическая печь 25 кг до 400°С	1,3
Каменная засыпка 100 кг до 400°С	10
Воздух в бане 12 кг до 100°С наверху и до 20°С внизу	0,27
Вода 10 литров до 100°С	1,2
Вода 200 литров до 40°С	9

По существу, в таблицах 14 и 15 таится вся трагедия мытных бань. Действительно, проще, экономичней и быстрее нагреть 200 литров воды для ванны, установленной в жилом помещении, чем специально прогреть помещение белой бани, затратив 40 кВт·час для нагрева бревенчатых стен, 60 кВт·час для нагрева самой кирпичной печи, 1 кВт·час для нагрева минимально необходимых для мытья одного человека 10 литров воды. Даже в случае современных малотеплоёмких хорошо утеплённых бань, но с обычной облицовкой (сталь, дерево), и малотеплоёмких стальных печей, картина хоть и существенно улучшается, но остаётся качественно примерно той же. Другое дело, если моется большая семья одновременно, как раньше в деревнях, тогда энергозатраты и затраты времени будут частично оправданы. Но сейчас моются индивидуально и тогда, когда захочется или потребуется. Иными словами, мытная баня в том прежнем виде может сохраниться как массовый объект лишь там, где технически невозможно греть достаточные для ванны и душа количества воды, или в том случае, если банные помещения очень хорошо утепляются или строятся с очень толстыми стенами и постоянно поддерживаются при высокой температуре. Справедливости ради, следует отметить выдающиеся достоинства бань в части удобства и качества мытья, но здесь мы пока затрагиваем лишь энергетические аспекты.

Энергетическая картина может революционно измениться в будущем лишь в случае внедрения ультралёгких утеплителей с плотностью ниже  $(0,05-0,1)$   $\text{кг}/\text{м}^3$  с ультралёгкой малотеплоёмкой облицовкой, например, пластиковой термостойкой, тонкой металлической или стеклянной. Если теплотраты на разогрев банной «коробки» не будут превышать  $(0,5-1,0)$   $\text{кВт}\cdot\text{час}$ , то в этом случае можно будет прогреть «коробку», затратив лишь незначительное количество той горячей воды, которая необходима для мытья. К сожалению, такая ситуация возникает сейчас пока лишь в условиях малоразмерных (тесных) пластиковых пародушевых кабин, и именно поэтому они пользуются успехом, несмотря на значительный расход воды на мытьё под душем.

При постройке зимней бани необходимо иметь в виду, что теплотраты на протопку высокотеплоёмкой белой бани (с толстыми брусовыми стенами без утеплителя, с кирпичной печью-каменкой) могут превысить теплотраты на летнюю протопку вдвое при принятой выше температуре потолка  $100^\circ\text{C}$ , а если эта температура ниже, то и втрое, и вчетверо. Поэтому зимние бани часто утепляют эффективным утеплителем (минватой, пенопластом) с облицовкой вагонкой. Стены при этом становятся многослойными. Их расчёт не представляет сложностей, но ввиду многочисленности конструкций стен дачнику придётся обсчитывать их самому: ранее в разделе 3 были приведены все необходимые для оценок данные. Отметим лишь, что если плита утеплителя (или утепляющая обивка вагонкой) расположена по наружным поверхностям стен, то теплоёмкость бревенчатых (или кирпичных) стен увеличивается, причём чуть ли не вдвое. Это обусловлено тем, что прогревать придётся уже весь массив древесины до утеплителя, а не только ту часть (половину), которая примыкает к отапливаемому помещению (по причине исчезновения в брёвнах перепада температуры). Если же утеплитель укладывается по внутренним поверхностям стен, то теплоёмкость, наоборот, резко уменьшается, и на прогрев требуется намного меньше тепла (см. раздел 3).

Вместе с тем, суммарная теплопроводность многослойной стены не зависит от порядкового расположения слоёв, то есть не зависит от того, снаружи ли стен или изнутри расположен утеплитель. Так что в полностью прогретой бане теплотери не будут зависеть от местоположения утеплителя. Но если в процессе эксплуатации будут возможны охлаждения протапливаемой бани (например, будут открываться окна и двери), то устойчивость температурного режима (так называемая «теплоустойчивость помещения» по СП23-101-2000) в бане будет определяться материалом внутренних поверхностей стен, а именно коэффициентом теплоусвоения этого материала, равным  $S=0,27(\lambda\rho C_p)^{1/2}$  (при периоде 24 часа), приве-

дённом в таблице 4, где  $\lambda$ ,  $\rho$  и  $C_p$  – теплопроводность, плотность и удельная теплоёмкость материала внутренних поверхностей стен.

В заключение отметим, что при всей технической очевидности факта высокой теплоёмкости бревенчатых стен по сравнению с каркасно-утеплёнными, большое число дачников (особенно женщин) тем не менее искренне убеждены в том, что именно бревенчатые (брусовые) бани наиболее «тёплые» и наиболее быстро прогреваются, что только бревенчатые бани можно считать зимними, а каркасно-утеплённые годятся лишь для лета. Вторым частым заблуждением горожан-дачников является искреннее убеждение в том, что жаркая баня может быть только с кирпичной печью-каменкой, хотя в действительности всё обстоит как раз наоборот.

### 5.3. Особенности ввода тепла в баню

Ранее мы молчаливо предполагали, что вводимое в баню тепло тут же потребляется всей баней целиком, и вследствие этого все элементы бани нагреваются равномерно. Но ведь ясно, что ведро с водой закипит на плите через один час, а ведро с водой на полу (или даже на банном полке у потолка) не закипит никогда. То есть одни элементы бани прогреваются быстро и, может быть, чрезмерно, а другие – крайне недостаточно.

Картину распределения тепла в бане определяет в первую очередь сама система отопления. Напомним, что системы отопления в самом общем случае состоят из следующих конструктивных элементов:

- теплового источника (теплонагревателя, печи, котла и т. п.);
- теплопроводов, перемещающих тепло, в том числе с помощью теплоносителей (дымовых газов, воздуха, воды, лучистого тепла и т. п.) от теплового источника к отопительным приборам;
- отопительных приборов (теплообменников), передающих тепло в помещение (в воздух, в стены, в воду и т. п.).

Если все три конструктивных элемента отопительной системы расположены в пределах одного помещения (комнаты), то такая отопительная система называется местной. Если тепловой источник обслуживает группу помещений, то отопительная система называется центральной, а тепловой источник – тепловым центром (тепловым пунктом, тепловой станцией, ТЭЦ). Если центральная система обслуживает группу зданий, то она называется районной (городской, зональной, магистральной, квартальной, заводской и т. п.). Наиболее перспективны центральные системы отопления. Современные модели таких систем могут обеспечивать помимо отопления и работу стандартных ванных и душевых комнат. Однако, к сожалению, далеко не каждая центральная система способна обеспечить

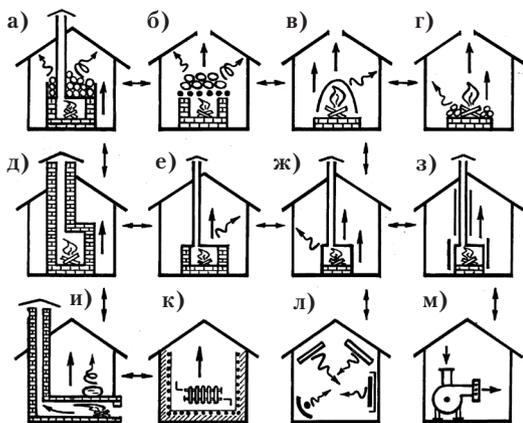


Рис. 65. Типы отопительных узлов: а – кирпичная печь с открытой каменкой, б – дымный открытый очаг-каменка, в – очаг с металлической жаровней, г – очаг (жаровня), обложенный валунами, д – кирпичная печь («голландка»), в том числе в вариантах: с варочной плитой («шведка»), с каменной засыпкой в дымовом канале («каменка»), с дымовыми каналами, переключаемыми на калориферный режим, е – отопительно-варочная плита, ж – цельнометаллическая печь («буржуйка»), з – цельнометаллическая печь экранированная (калориферная), и – подвальная печь в термах и хаммамах («глипокауст»), к – пароводяная или электрокабельная система нагрева пола и стен, л – радиационные панели (инфракрасные обогреватели), м – электровоздухонагреватель. Двойными стрелками связаны узлы, имеющие аналогии. Прямые стрелки – конвективные потоки тепла, волнистые стрелки – потоки лучистой энергии, спиральные стрелки – потоки пара при поддачах.

и – подвальная печь в термах и хаммамах («глипокауст»), к – пароводяная или электрокабельная система нагрева пола и стен, л – радиационные панели (инфракрасные обогреватели), м – электровоздухонагреватель. Двойными стрелками связаны узлы, имеющие аналогии. Прямые стрелки – конвективные потоки тепла, волнистые стрелки – потоки лучистой энергии, спиральные стрелки – потоки пара при поддачах.

по температурным параметрам работу внутридомового (квартирного) банного помещения, и это несомненно является главным неблагоприятным фактором для развития квартирного банного дела.

До сих пор в дачных банях используются исключительно местные системы отопления, чаще всего печи на твёрдом топливе или электрические. Наиболее дешёвый вариант – локальный, совмещающий в одной пространственной точке и нагрев воздуха, и воды, и теплоаккумулирующего устройства. В этом случае равномерного и одновременного прогрева всех элементов бани ожидать не приходится.

Для наглядного анализа используем чисто иллюстративную схему модельных отопительных узлов (рис. 65). За исходную точку условно примем цельнокирпичную отопительную печь произвольной конструкции (рис. 65д). При вводе тепла в такую печь (например, за счёт сжигания топлива или нагрева токоведущих элементов) сначала прогревается кирпичная кладка и только после этого от тёплых стенок печи начинает прогреваться воздух, а затем тёплый воздух сможет нагреть стены бани. Предположим, что в печи сжигается 10 кг дров в час, и в топке при этом выделяется 20 кВт тепла (при коэффициенте полезного действия 50%). Тогда печь массой 1000 кг, требующая для своего прогрева 60 кВт·час тепла (см. раздел 5.2), нагреется за 3 часа. Только после этого печь станет

греть воздух, но кирпичная кладка может пропустить через себя лишь ограниченный тепловой поток. Так, если внутренние стенки топливника нагреваются до максимально возможного уровня (до температуры пламени  $900^{\circ}\text{C}$ ), то тепловой поток через стенки полностью прогретого топливника составит  $Q=(900^{\circ}\text{C}-20^{\circ}\text{C})/R=3\text{кВт}/\text{м}^2$ , где  $R=(1/\alpha)+(\delta/\lambda)$  – термическое сопротивление,  $\alpha=10$  Вт/ $\text{м}^2\cdot\text{град}$  – коэффициент теплоотдачи от внешних стенок топливника в воздух помещения,  $\delta=0,12$  м – толщина стенки топливника,  $\lambda=0,6$  Вт/ $\text{м}\cdot\text{град}$  – коэффициент теплопроводности кирпича. Внешние стенки топливника нагреваются при этом до расчётного (но недопустимого) уровня  $300^{\circ}\text{C}$ . Это значит, что при площади поверхности топливника порядка  $1$  м<sup>2</sup>, печь сможет отдать в воздух лишь до  $3$  кВт из выделяющихся  $20$  кВт, а остальные  $17$  кВт будут вылетать из топливника и греть дымообороты и дымовую трубу, а когда нагреются и они, то тепло будет вылетать через дымовую трубу в атмосферу, снижая КПД печи и уже никак не влияя на баню. В реальности же, теплопередача печи (тепловые потоки через кирпичную кладку) ещё меньше и не превышают  $1$  кВт/ $\text{м}^2$  даже при использовании огнеупорного шамотного кирпича, а в среднем по всей поверхности печи составляет обычно  $0,3-0,5$  кВт/ $\text{м}^2$  при температуре наружной поверхности печи  $90-120^{\circ}\text{C}$ . Это означает, что мощность кирпичной печи (скорость выделения тепла в топливнике, равная, к примеру,  $20$  кВт) весьма условно связана с теплоотдачей печи (скоростью отвода тепла через кирпичные стенки в воздух бани, равной, к примеру,  $2$  кВт при площади внешних стенок печи  $4-5$  м<sup>2</sup>), причём мощность кирпичной печи всегда намного больше теплоотдачи печи.

Таким образом, создаётся впечатление, что кирпичная печь крайне неэффективна как отопительное устройство. Действительно, с помощью нагретых наружных стенок кирпичных печей нагреть баню до необходимой температуры невозможно. Но есть одно замечание. Дело в том, что тепло, выделяющееся в печи при её прогреве, никуда не пропадает, а накапливается в кирпиче и, значит, может быть выделено в помещение. Так, например, в средневековых замках Европы протопкой дров в печи нагревали многочисленные дымовые каналы (трубы) в многоэтажных стенах, а затем печь гасили, и открывали многочисленные отверстия в дымовых каналах так, чтобы поднимающийся вверх тёплый, нагревающийся в дымовых каналах печи воздух, поступал в жилые помещения. Именно этот воздушный способ отопления был использован в первых ирландских банях в дополнение к способу повышения эффективности кирпичных (каменных) печей за счёт увеличения площади их стен, а именно путём совмещения печных стенок со стенами и полами банного помещения (рис. 65и). Но особенно эффективным методом извлечения тепла из внутренних зон кирпичных печей является испарительно-конденсационный

(паровой). Он основан на большой теплоте испарения воды, подаваемой внутрь печи, и выделении тепла при конденсации пара на теле человека и на стенах внутри помещения. Напомним, что если бы у воды теплота испарения (равная теплоте конденсации) была бы мала (например, как у керосина), то на подачу (с целью нагрева, а не увлажнения) потребовалось бы в 6 раз больше воды (теплоты испарения воды и керосина составляют 539 и 93 кал/г соответственно). Если же для извлечения тепла из каменки использовать воздух, то вместо каждого литра подаваемой воды надо было бы продувать через каменку  $20 \text{ м}^3$  воздуха.

При использовании парового метода происходит также и увлажнение воздуха в бане, что даёт добавочный эффект уменьшения теплопотерь с тела человека за счёт снижения скорости испарения влаги с кожи. Вместе с тем, именно по этой причине использовать испарительно-конденсационный метод в жилых помещениях невозможно. Поэтому испарительно-конденсационный метод является исключительно банным и в качестве такового приобрёл в народе особый таинственный ореол, какой-то глубинный житейский смысл. Чтобы не разрушать кирпичную кладку от резких смен температуры при поливании водой, внутрь печи закладывают специальный термостойкий высокотеплоёмкий балласт – засыпку из кусков камня (каменку) или металла (чугунку, которую будем называть также условно каменкой), на которую и льют воду («подают»). Кирпичные печи со специальной высокотеплоёмкой термостойкой засыпкой называются печами-каменками. Теплоёмкость обычных дачных каменок не столь уж велика: как мы уже оценили в предыдущем разделе, порядка 10 кВт·час при массе каменки 100 кг. Но этого достаточно для испарения 12 литров воды, причём, если испарить все 12 литров воды за 5 минут, то мощность нагрева помещения за эти 5 минут составит 110 кВт, а если испарить за 1 минуту – то мощность превысит 500 кВт, причём всё это тепло будет выделено преимущественно на потолке. Это очень большие тепловые нагрузки, и они могут быть достигнуты только длительной предварительной аккумуляцией тепла. Поэтому каменки безусловно являются очень важным элементом бань. Однако надо со всей определённой отметить, что практически все современные каменки (например, в металлических и кирпичных печах с плитами) служат лишь для увлажнения воздуха (в том числе и до сверххототермального уровня), поскольку и без каменок эти современные тепловые источники обеспечивают своей теплоотдачей прогрев бани до необходимого температурного уровня. А вот раньше в отдельных чёрных банях и во всех без исключения белых паровых банях с цельнокирпичными печами-каменками (без плит) паровой прогрев помещений был определяющим, и вследствие этого массы каменок достигали громадных величин – (50–100) кг камней на  $1 \text{ м}^3$  бани (парилки).

С появлением чугунных печных листов (настилов), так называемых плит (в том числе варочных), стало возможным создавать открытые каменки (рис. 65а), которые одновременно обеспечивают повышенную теплопередачу с поверхности печи, дают возможность увлажнять воздух путём испарения воды и, кроме того, испускают лучистое тепло. Такие «бездымные» открытые каменки максимально имитируют в плане отопления открытые очаги (костры) чёрных бань (рис. 65б, в, г). Чугунные листы (настилы) в своё время дали возможность создавать кирпичные отопительно-варочные плиты (рис. 65е) с резко усиленной теплоотдачей во время топки. Развитие кирпичных печей с плитами в направлении всё более широкого применения металла привело к появлению цельночугунных литых и цельносталевых сварных печей, имеющих рекордно низкие теплоёмкости (рис. 65ж). В комплекте с открытыми каменками они также максимально имитируют (в плане тепловых потоков) очаги чёрных бань и лаконикумов (рис. 65в). Тем не менее, финны выбрали для своих сухих саун с целью имитации дымных саун (в бездымном варианте) экранированные металлические печи с максимально ограниченным уровнем инфракрасного излучения (рис. 65з), в том числе и с открытыми каменками.

Металлические печи как огонь: только затопил – тотчас тепло, погасил – сразу холодно. Чугунные печи очень долговечны, в том числе за счёт высокой коррозионной стойкости чугуна, хотя к качеству металла (наличие раковин, трещин, неровностей, наплывов) нарекания были всегда. Чугун малотехнологичен, не прокатывается, плохо сваривается. Поэтому чугунные изделия изготавливают методом литья, технология которого широко использовалась веками, отработана в массовом масштабе, дешева, но уже морально устарела, в первую очередь, ввиду неустойчивого качества и высокой металлоёмкости (хотя в последнее время за рубежом освоены новые методы такого литья бытовых печей и каминов). Стенки чугунных печей и водонагревательных котлов имеют среднюю толщину с учётом рёбер жёсткости 5–15 мм, вследствие чего изделия очень тяжелые и прогреваются при мощности в топливнике 20 кВт за 15–30 минут. Для дачников фактически приемлемы только разборные чугунные печи, состоящие из отдельных литых деталей. При толщине стенок чугунных плит в среднем 10 мм тепловой поток 20 кВт/м<sup>2</sup> проходит при перепаде температур на плите всего 4–5°С (при теплопроводности чугуна 58 Вт/м·град). Это означает, что теплопередача чугунных печей может быть сопоставима с их мощностью в топливнике, определяемой из часового расхода дров с учётом коэффициента полезного действия по ГОСТ 9817-95.

Стальные печи имеют толщину стенок 2–5 мм, а печи из нержавеющей стали 1–2 мм. Прогреваются они за 5–15 минут, а перепад температур на стенках не превышает 1–2°С (при теплопроводности стали

50 Вт/м·град). Сталь не столь коррозионностойка, а при температурах выше 500°С теряет механическую прочность на изгиб. При нагреве сильно расширяется, причём при неравномерном нагреве коробится, а при охлаждении образует складки и трескается. Так что стальные печи в основном топятя дровами. Но ввиду высокой технологичности стали, сварные печи в виде аппаратов с водяным контуром (котлы, водонагреватели, водогрейные колонки) нашли широчайшее распространение, в том числе работающие на электричестве.

Ясно, что в энергетическом смысле бане абсолютно безразлична физическая природа выделяемого в печи тепла. Баня «не знает», что горит в печи: дрова ли, торф, уголь, газ или жидкое топливо. А вот дачник знает, и ему не безразлично, что использовать в качестве энергоресурса. Чаще всего его больше всего устраивают либо дрова, либо электричество. Причём опыт работы с дровяными печами подсказывает банные способы использования электронагревателей. Так, различного рода тёплые электрообогреваемые полы и стены, широко используемые ныне в городских квартирах, имитируют условия хаммамов (рис. 65к). При этом может использоваться и промежуточный теплоноситель – вода, текущая по трубам в стенах или по батареям. Радиационные панели (инфракрасные обогреватели) имитируют условия чёрных бань (рис. 65л). Различного рода электронагреватели потоков воздуха (теповентиляторы, фены, тепловые воздушные завесы, тёплый вентиляционный приток с электрокалорифером, обогревающие кондиционеры и др.) имитируют финскую сухую сауну (рис. 65м). Если у дачника есть ограничения по потребляемой электрической мощности, то единственным способом использования электрической энергии в банях остаётся теплоаккумулирующий, в том числе использующий банную каменку.

Особый интерес представляют известные, но непривычные пока для рядового российского дачника способы обогрева помещений за счёт тёплых полов, стен и потолков. Дело в том, что характерным видом обогрева помещений в России раньше был печной, а сейчас водяной (за счёт батарей-радиаторов или конвекторов). Приборы отопления при этом являются локальными и отдают тепло преимущественно кондуктивно-конвективным образом, причём отдают тепло воздуху. Вследствие этого воздух имеет более высокую температуру, чем стены. Более того, стены греются именно за счёт тёплого воздуха помещения. Это даёт возможность чётко определить чисто бытовым приёмом, тёплый ли у вас дом или нет. Если внутренняя поверхность наружных стен (обращённая внутрь помещения) тёплая, причём зимой, то и дом тёплый. Некоторые дачники оценивают «теплоту» стен прикосновением к ним ладонью, при этом естественно получается так, что каменная поверхность всегда холодная, а деревянная или, например, пено-

полимерная – всегда тёплая. Поэтому такие дачники обычно уверены, что кирпичный дом холодней деревянного всегда, и в этом их переубедить бывает очень трудно. В действительности же, ощущение тепла при прикосновении руки к поверхности предмета формируется не только температурой поверхности, а скорее теплопроводностью и теплоёмкостью поверхности тела. Это значит, что надо измерять температуру поверхности стен помещения термометром. Если температура стены (то есть поверхности внутренней стороны наружной стены) ниже температуры воздуха в помещении не более, чем на  $4^{\circ}\text{C}$ , то такое помещение считается тёплым и пригодным для проживания (СНиП23-02-2003). А если стена холодней воздуха на  $12^{\circ}\text{C}$  и более, то такое помещение не пригодно даже для производственных нужд с постоянным пребыванием людей, поскольку, во-первых, наблюдается постоянное выделение конденсата на стенах, а во-вторых, человек испытывает озноб из-за больших лучистых теплопотерь. Действительно, при нормальной температуре воздуха зимой внутри помещения  $20^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности воздуха 60% абсолютная влажность воздуха составляет  $0,01 \text{ кг/м}^3$ , а точка росы соответственно  $12^{\circ}\text{C}$ . Если стена холодней воздуха на  $12^{\circ}\text{C}$ , то температура стены составит  $8^{\circ}\text{C}$ , то есть ниже точки росы  $12^{\circ}\text{C}$ , и на стене будет выделяться роса (конденсат). Всем известны явления увлажнения и даже промерзания углов дачных домов зимой. Это значит, что относительную влажность воздуха в этом помещении надо снизить, например, до уровня 45% и ниже. Низкая температура стен приводит к дополнительному охлаждению тела человека. Так, в нормальном жилом помещении с температурой воздуха  $20^{\circ}\text{C}$  и температурой стен  $16^{\circ}\text{C}$  теплопотери человека с температурой открытых частей тела  $24^{\circ}\text{C}$  составят  $\alpha_{\text{к}}(24^{\circ}\text{C}-20^{\circ}\text{C})+\alpha_{\text{л}}(24^{\circ}\text{C}-16^{\circ}\text{C})=96 \text{ Вт/м}^2$ . А в помещении с холодными стенами  $8^{\circ}\text{C}$  и температурой воздуха  $20^{\circ}\text{C}$  теплопотери составят  $\alpha_{\text{к}}(24^{\circ}\text{C}-20^{\circ}\text{C})+\alpha_{\text{л}}(24^{\circ}\text{C}-8^{\circ}\text{C})=152 \text{ Вт/м}^2$ , где  $\alpha_{\text{к}}=10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}$  и  $\alpha_{\text{л}}=7 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}$  коэффициенты кондуктивной и лучистой теплопередач. Эти выводы качественно абсолютно привычны в бытовых условиях. В полном соответствии с этими представлениями СП23-101-2000 нормирует точку росы в жилых помещениях (не ниже  $10,7^{\circ}\text{C}$ ). Аналогично, разница температур стен и воздуха численно связана с термическим сопротивлением стен, также нормируемым в СП23- 101-2000.

Совершенно иная ситуация возникает при обогреве помещения тёплыми ограждающими конструкциями. Стены помещения имеют более высокие температуры, чем воздух, и выпадение росы на стенах просто невысказано. Ощущение комфорта у одетого человека при температуре стен, например,  $22^{\circ}\text{C}$  обеспечивается уже не при  $20^{\circ}\text{C}$ , а при  $18^{\circ}\text{C}$  и ниже. Также как и при обычном российском отоплении, комфортная температура воздуха снижается при наличии физической нагрузки: при лёгкой рабо-

те 16°C, при умеренной работе 14°C, при тяжёлой работе 10–12°C. В то же время экспериментально установлено, что температуру стен в жилых помещениях нельзя повышать до сколь угодно высоких уровней: голова человека при отсутствии воздушных потоков должна терять излучением 11,6 Вт/м<sup>2</sup> (А.Н. Сканави, Отопление, М.: АСВ, 2002 г.).

Если температура ограждающих конструкций выше температуры воздуха в помещении, то этот способ отопления жилых и производственных помещений называется лучистым. Средняя температура стен называется радиационной температурой. Это означает терминологически, что лучистое отопление имеет место при условии, если радиационная температура стен превышает температуру воздуха в помещении.

В банных условиях отопление называется лучистым, если радиационная температура превысит 40°C, поскольку в энергетическом балансе человека появится дополнительный положительный источник тепла. За счёт этого радиационного тепла могут быть снижены температура воздуха в бане (иногда даже до уровня ниже 40°C) и абсолютная влажность воздуха. Это оказывается особо полезным при наличии мощной общеобменной вентиляции в бане. Всё это в совокупности позволяет предполагать, что именно лучистое отопление лучше всего подходит для квартирных бань будущего. При этом комфортное лучистое отопление может быть достигнуто разными конструктивными приёмами. Дело в том, что инфракрасные источники подразделяются в зависимости от температуры излучателя на низкотемпературные (ниже 70°C), среднетемпературные (с «умеренной» температурой от 70 до 250°C), высокотемпературные (до 900°C), осветительные (до 2500°C) и высокоинтенсивные (свыше 2500°C). Ясно, что чем выше температура источника, тем меньше должна быть его площадь для получения той же мощности излучения (как интегральной по спектру, так и спектрально фиксированной). Но чем меньше площадь теплового источника, тем больше неоднородность поля температур в помещении. Поэтому при высокой температуре источника его надо дробить на большое число источников меньшей мощности, и равномерно распределять их на всей поверхности ограждающих конструкций. Более того, каждый локальный источник желательно «размазывать» с помощью рассеивающих отражателей. Единичные локальные мощные лучистые высокотемпературные источники были характерны для самых первых бань примитивного типа – чёрных (лаконикумов и курных мытных изб). Для хаммамов характерны пространственно распределённые низкотемпературные лучистые источники в виде тёплых стен и полов. Распределённые по всей площади высокотемпературные источники могут быть созданы только на электрической основе.

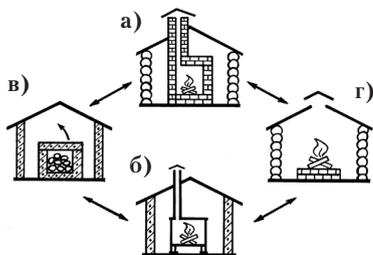


Рис. 66. Пределные энергетические схемы бани: а – высокотеплоёмкая (кирпичная) печь с высокотеплоёмкими рублеными стенами, б – низкотеплоёмкая (стальная) печь с низкотеплоёмкими каркасно-утеплёнными стенами, в – высокотеплоёмкий теплоаккумулятор и низкотеплоёмкие стены, г – низкотеплоёмкий дымный очаг (или металлическая печь) и высокотеплоёмкие стены (чёрная баня).

#### 5.4. Аккумуляция тепла

Принцип аккумуляции тепла является определяющим для правильного понимания конструкций и древних бань, и ультрасовременных. Когда мы говорили в разделе 5.2 о тепловой инерции строения и отопительного узла в целом, то фактически имели в виду аккумуляцию тепла в бане.

Напомним, что тёплые (то есть с малыми тепловыми потерями в разогретом состоянии) бани могут энергетически мыслиться в следующих противоположных по теплоёмкости предельных вариантах (рис. 66). Во-первых, это особо высокотеплоёмкие бани (с высокотеплоёмкими стенами и печами), например, так называемые белые бревенчатые (рубленые) бани с цельнокирпичной печью (рис. 66а). В таких банях либо вынужденно используют пар для эпизодического или периодического вывода тепла из массива печи (из каменки) для подогрева помещения, либо очень долго топят печь (днями и неделями), а потому используют (поддерживают при высокой температуре) постоянно. К этому классу относятся усадебные бани, термы, хаммамы, городские непрерывно работающие коммунальные бани. Характерной чертой всех этих бань является долгое остывание, в частности, устойчивость температурного (именно температурного, но не влажностного) режима при залповых проветриваниях.

Во-вторых, это особо низкотеплоёмкие бани (с низкотеплоёмкими стенами и печами), например, утеплённые изнутри эффективным утеплителем и обогреваемые цельнометаллическими печами (рис. 66б). Такие бани в народе сейчас называются условно «саунами» в отличие от «русских» бань с кирпичными печами (рис. 66а), хотя такие сауны вовсе не обязаны быть по-фински сухими, в них можно даже очень удобно мыться. Характерной чертой саун является очень быстрое остывание при проветриваниях, поэтому печь в них горит преимущественно постоянно во время всей банной процедуры.

В-третьих, это промежуточный вариант бани с высокотеплоёмкими стенами с низкотеплоёмким (начинающим быстро выделять тепло, причём с высокой теплоотдачей, сопоставимой с мощностью) тепловым ис-

точником, например, открытым костром (рис. 66г). Это, пожалуй, самые «настоящие» бани (русские чёрные мытейные избы, финские дымные сауны), достаточно быстро прогреваемые, причём до весьма высоких температур (у потолка до 100–200°С). Никакого пара для прогрева не требуется, жаркое помещение может лишь увлажняться паром или использоваться как «пещера с костром». Чтобы этот тепляк стал баней, нужна тёплая вода, неминуемо создающая высокую влажность, неприемлемую для жилых помещений. Для получения горячей воды использовали валуны, укладываемые внутрь костра или вокруг костра и формирующие место для костра (очаг). Горячие валуны погружались в воду, нагревая её, либо вода лилась на камни, испарялась, затем пары воды конденсировались на теле человека, увлажняя кожу и веник. Так что в схеме на рис. 66а пар просто необходим, а в схеме на рис. 66г не обязателен (если уже есть горячая вода, нагретая в закрытых котлах). Действительно, в бревенчатой бане с помощью цельнокирпичной печи поднять температуру выше 40–50°С удаётся лишь после нескольких дней протопки, и прогреть обычно прохладное помещение такой бани (парилки) без пара просто невыполнимо. А входя в чёрную баню вы встречаете столь мощное тепло с потолка и порой настолько чрезмерное излучение от куши камней очага, что думать о каком-либо паре не приходится. Пар в такой бане, бывает, просто «сворачивает» уши. Именно высокая теплоёмкость потолка, стен и очага позволяет проветривать (а затем «опаривать») баню после прогорания дров. Никакой чёрной бани в низкотеплоёмком помещении создать невозможно: как ни топи костром баню, низкотеплоёмкие очаг, потолок и стены тотчас остынут при проветривании от дыма.

В качестве малотеплоёмкого теплового источника на рисунке 66г можно использовать не только костёр, но цельнометаллическую деревянную или электрическую печь. В этом случае бревенчатая баня будет максимально имитировать чёрную баню в бездымном варианте, особенно при наличии теплоёмкой открытой каменки (являющейся частью бани, а не теплового источника). Таким образом, мы видим, что сауна (баня с металлической печью) в бревенчатом варианте безусловно сильно отличается от саун в каркасно-утеплённом исполнении, в первую очередь потому, что может использоваться с потушенной печью, а значит и с малыми аэродинамическими потоками. В литературе и быту схемы на рисунках 66а, б и г часто не могут различить и чётко разделить по энергетической сути, что приводит к известной путанице понятий и ошибочности заключений и технических решений. Так одни, не сообразуясь с типом бани, советуют делать каменку из расчёта 60 кг на 1 м<sup>3</sup> бани, а другие – лишь 2 кг на 1 м<sup>3</sup> бани, а третьи считают, что камни не нужны вовсе. Од-

ни ошибочно считают, что чёрные бани прогреваются паром, другие столь же ошибочно считают, что в белых банях главное – хорошее перемешивание пара с воздухом, хотя в действительности в белых банях пар должен греть потолок и стены за счёт конденсации, а не смешиваться с воздухом. А вот в бревенчатых саунах действительно важно хорошо перемешивать увлажняющий пар с воздухом. Ну, наконец, по глубинной сути в корне неверным является бытующее у русских мнение, что русские паровые бани и финские сухие сауны отличаются лишь температурой и влажностью воздуха: в действительности же, они отличаются фактически всем (и сущностью процедуры, и конструкцией, и назначением, и энергетикой, и скоростью прогрева, и температурной устойчивостью и т. д.).

В четвёртых, имеется возможность создать высокотеплоёмкий тепловой источник в низкотеплоёмком помещении (рис. 66в). В дачном быту такой вариант используется довольно часто в рядовых (бедняцких) исполнениях: дешёвая кирпичная печь-каменка в дешёвом каркасно-утеплённом строении. Перспективность таких конструкций вовсе не очевидна. Более того, это направление считается устаревшим и никогда не обсуждается ни в быту, ни в литературе. Тем не менее именно с этим направлением связано всё будущее гигиенических бань, в то время как предыдущие варианты (рис. 66а, б, г) останутся в основе досуговых бань.

Суть решения (рис. 66в) состоит в том, что высокотеплоёмкий тепловой источник аккумулирует внутри себя столь большое количество тепла, что если его вывести в помещение, то низкотеплоёмкие холодные стены быстро нагреются до необходимой температуры. Ситуация в чём-то сходна с технологией прогрева помещения острым паром, образующимся при подаче на каменку кирпичной печи (рис. 66а). Но с одним замечанием: если в случае прогрева высокотеплоёмких стен необходима очень большая мощность, которая может быть обеспечена только паром, то в случае низкотеплоёмких стен эта мощность может быть снижена до столь низкого уровня, что вполне достаточно воздушное выведение тепла за счёт продува воздухом внутренностей печи. В результате помещение бани не увлажняется и потому может быть размещено в жилой зоне. Например, трубчатый электрический нагреватель (ТЭН), пусть с очень низкой мощностью, но долго, нагревает большую каменку, заложенную в очень хорошо утеплённый корпус в виде ящика с крышкой. При необходимости быстрой протопки бани, дачник просто-напросто открывает крышку ящика или продувает каменку пылесосом. За счёт нагрева воздуха от камней нагреваются и стены бани. Ясно, что даже самые обычные в быту электрические мощности порядка 1 кВт могут накопить за неде-

лю в камнях 150 Квт-час тепла, что теоретически вполне достаточно для протопки даже бревенчатой бани.

Эффективность указанной схемы повышается с увеличением теплоёмкости теплового источника и уменьшением теплоёмкости стен. Приведём для справки теплоёмкости и ряда теплоаккумулирующих материалов (для песка в насыпном состоянии).

Материал	Удельная теплоёмкость массовая		Удельная теплоёмкость объёмная	
	кДж/кг-град	Квт-час/тонна-град	кДж/дм <sup>3</sup> -град	кВт-час/м <sup>3</sup> -град
Базальт	0,88	0,24	2,4	0,67
Магнезит	1,05	0,29	4,1	1,13
Корунд	0,88	0,24	3,3	0,91
Песок	0,88	0,24	1,2	0,33
Бетон	0,84	0,23	2,0	0,55
Кирпич	0,88	0,24	1,6	0,44
Древесина (сосна)	2,3	0,64	1,1	0,31
Сталь, чугун	0,48	0,13	3,7	1,02
Вода	4,2	1,16	4,2	1,16

Наиболее просто использовать для теплоаккумуляции металл и камень, которые можно нагреть до очень высоких температур порядка 1000°С, и запастись тем самым много тепла, тем более, что соответствующие теплоизоляционные материалы имеются (перлит, шамот, базальтовая и каолиновая вата и т. п.). Но камень или металл в виде единого сплошного блока (монолита) использовать сложно: необходимы способы ввода и вывода тепла из монолитного камня или металла – испарительно-конденсационные (как при поддачах) или вентиляционные (продувом воздуха). Поэтому каменные и металлические материалы чаще используются в виде кусков: камней неправильной формы или блоков (кирпичей) для более плотной упаковки. В банях такие теплоаккумуляторы известны в форме каенок – каменных засыпок. Появились и первые бытовые напольные теплонакопители (внешне похожие на электрические масляные обогреватели), потребляющие энергию только ночью (когда стоимость электроэнергии минимальна), а днём только отдающие накопленное тепло в жилые помещения. Начат выпуск теплонакопителей для саун в виде дровяной печки-термоса с 60 кг камней, а также в виде электрической печи-аккумулятора со 100 кг камней, постоянно работающей в режиме ожидания с малой электрической мощностью. Появились первые разработки банных печей с вращающимся теплоёмким контейнером или монолитным камнем (С.И. Несов, Патент РФ № 49191, 2004 г.).

Вода как теплоаккумулирующий агент имеет очень существенные достоинства перед твёрдыми материалами. Она жидкая и может легко подаваться в различного рода теплообменники (радиаторы). Нагрев и длительное сохранение воды в горячем состоянии уже давно хорошо освоено, в том числе и в быту. Широко известные бойлеры – накопительные водонагреватели по существу являются как раз такими теплоаккумуляторами. Все современные ванны и души основаны на предварительной аккумуляции тепла в заранее подогреваемой воде, и нет доводов, что баня в современном исполнении должна базироваться непременно на ином теплоаккумулирующем агенте. Тысячи городских теплоцентралей днём и ночью непрерывно греют воду «про запас», чтобы любой горожанин в любую секунду мог воспользоваться этой горячей водой для нагрева и мытья. Недостатком воды является невозможность её нагрева выше  $100^{\circ}\text{C}$  (из-за опасности высоких давлений пара в быту), что снижает её теплоаккумулирующие и нагревающие способности. Тем не менее, этот недостаток во многом компенсируется уникально высоким значением удельной теплоёмкости и возможностями работать с очень большими объёмами воды.

В отличие от камней и металлов вода является жидким теплоаккумулирующим агентом, а потому не требует использования воздуха или пара как теплопередающих агентов (теплоносителей) для нагрева стен. Например, если у дачника есть теплоизолированный бойлер с горячей водой (подогреваемой, может быть, очень долго электрокипятильником малой мощности), то для нагрева стен достаточно перелить эту горячую воду в полости (обечайки) внутри малотеплоёмкой (и теплоизолированной с внешней стороны) стены бани. Ещё удобней просто облить этой горячей водой внутреннюю поверхность малотеплоёмкой стены.

В качестве высокотеплоёмкого нагревателя воздуха могут выступать и сами стены, постоянно поддерживаемые в нагретом состоянии источником тепла малой мощности. Например, горячая стена может быть отделена от помещения теплозащитной облицовкой, и в случае необходимости нагрев помещения осуществляется распахиванием дверок в облицовке (открытием «обогревающих» стенных шкафов). Этот, в общем-то, тривиальный случай полностью аналогичен нагреву воздуха после залпового проветривания бани (рис. 67). До прогрева стен температура воздуха в бане была равна температуре наружного воздуха  $T_1$  (рис. 67а). Во время протопки источником большой мощности температура воздуха повышается до  $T_2$  (рис. 67б). После выключения источника нагрева температура воздуха в бане тотчас снижается до температуры внутренних поверхностей стен  $T_3$ . В результате залпового проветривания температура в бане снижается с  $T_3$  до  $T_1$  (рис. 67в). После залпово-

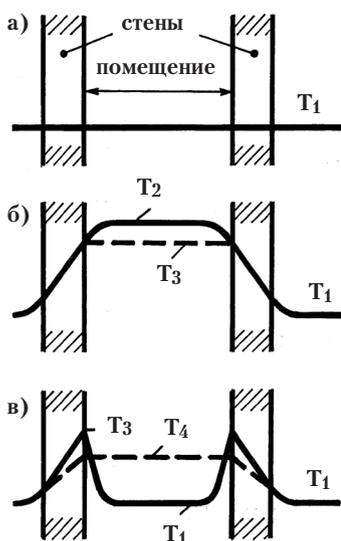


Рис. 67. Модельные распределения температуры в бане:  $T_1$  – до протопки,  $T_2$  – после протопки с горячей печью,  $T_3$  – после протопки с погашенной печью,  $T_1$  на рис. в – в протопленной бане сразу после залпового проветривания,  $T_4$  – установившаяся температура после проветривания и после нагрева воздуха от стен.

го проветривания воздух в бане нагревается до  $T_4$  за счёт горячих стен. Стены при этом охлаждаются (с  $T_3$  до  $T_4$  на внутренней поверхности), причём при большой теплоёмкости стен снижение температуры  $\Delta T = T_3 - T_4$  оказывается незначительным. Таким образом, рисунок 67в отвечает случаю нагрева малотеплоёмкой бани (то есть воздуха) высокотеплоёмким тепловым источником (массивными горячими стенами).

Процесс нагрева воздуха от горячих стен на рисунке 67в определяется не только теплоёмкостью стен, но и их теплопроводностью. Действительно, если теплопроводность стен очень мала (по крайней мере, меньше теплопередачи через воздушный пристеночный пограничный слой), то поток тепла изнутри стен к внутренней поверхности стен будет очень малым, и нагрев воздуха от стен будет очень медленным. Точно так же будет медленным нагрев глубинных зон стен горячим воздухом на рисунке 67б. Иными словами, эффективность стен как теплоаккумулирующих нагревателей определяется произведением удельной теплоёмкости (объёмной) и коэффициента теплопроводности стен, то есть теплоусвоением стен.

При обсуждении рисунка 66 применялись понятия малой и большой теплоёмкости стен и теплового источника. При этом не просто сравнивались численные величины теплоёмкостей стен и источников. Полагают, что высокотеплоёмкость источника означает высокую длительность прогрева корпуса теплового прибора, то есть предполагают малость мощности теплового источника по сравнению с его теплоёмкостью. При этом считают, что специальные теплоаккумулирующие узлы (например, камни или баки с водой) на этапе прогрева не входят в состав теплового источника, а являются частью бани, повышая её теплоёмкость. Но потом эти теплоаккумуляторы могут стать самостоятельными тепловыми источникам, причём, в нашем понимании, малотеплоёмкими, поскольку способны тотчас выдавать тепло в воздух.

При постройке обычных бань дачник самостоятельно выбирает энергетический тип бани (по рис. 66), как правило, интуитивно. Так, представительские бани создаются предпочтительно по схемам 66а и 66г, рядовые дачные по схеме 66б, гигиенические бани будущего, способные конкурировать с ваннами и душами, могут мыслиться, как мы уже отмечали, только по схеме 66в, причём желательно с применением воды как энергоёмкого теплоаккумулирующего агента.

### 5.5. Каменки

Работать с горячей водой в древности не умели. Поэтому традиционными теплоаккумулирующими устройствами древнейших бань являлись всевозможные каменки – кучи (насыпи, засыпки, навалы, обваловки) камней: крупных окатанных валунов, окатанных среднего размера булыжников, крупных ломаных глыб, более мелких кусков, в том числе натурального гравия и искусственно долблёного щебня, вплоть до крошки и песка.

В популярной литературе обычно различают каменки закрытые (располагаемые внутри печи) и открытые (располагаемые вне печи). Понятие закрытых каменок относится преимущественно к цельнокирпичным печам и означает, что камни расположены в атмосфере дымовых газов печи (в топке, в дымовой трубе или её расширении) так, чтобы пламя и дымовые газы нагревали слой камней (рис. 68б). Такие каменки могут быть использованы лишь после протопки печи и поэтому называются иногда в банном деле более научно – каменками периодического (эпизодического) действия. Понятие открытых каменок относится к печам более современным, имеющими металлические теплопередающие поверхности – жаровые плиты или разного рода контейнеры для нагрева камней (рис. 68в, г). Такие каменки не соприкасаются с дымовыми газами, могут использоваться для получения пара в любой желаемый момент и называются поэтому каменками непрерывного действия. Такая классификация удобна для анализа бань, но не энергетике печи, поскольку непонятно, как категорировать каменки чёрных бань и многочисленные

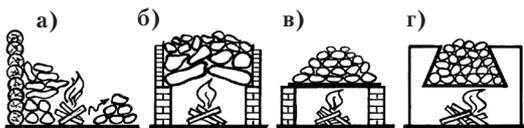


Рис. 68. Виды каменок: а – камни нагреваются в открытом очаге, б – камни в потоке дымовых газов, в – камни на раскалённой металлической плите, г – камни в раскалённом металлическом углублении (сосуде, ящике).

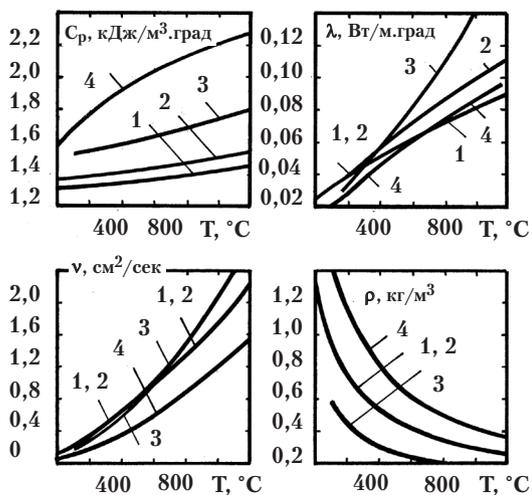


Рис. 69. Температурные зависимости свойств разных газов (удельной объёмной теплоёмкости  $c_p$ , теплопроводности  $\lambda$ , кинематической вязкости  $\nu$ , плотности  $\rho$ ): 1 – воздух, 2 – дымовые газы стандартного состава (76%  $\text{N}_2$ +13%  $\text{CO}_2$ +11%  $\text{H}_2\text{O}$ ), 3 – водяной пар, 4 – углекислый газ (А.Л. Бергауз и др. Справочник конструктора печей прокатного производства, М.: Металлургия, 1970 г.). Данные по теплоемкости требуют уточнения.

конструкции открытых каменок в закрытом исполнении. В дальнейшем мы будем разделять типы каменок по технологическому принципу нагрева – каменки фильтрующие (продуваемые) и нефилтрующие (непродуваемые дымовыми газами).

В открытых (дымных) очагах камни нагревались преимущественно лучистым теплом от углей костра (рис. 68а справа). В стремлении повысить эффективность нагрева камней (которые использовались не только для аккумуляции тепла, но и для нагрева воды, и для получения пара) обваловку старались делать повыше (в первую очередь у стен для одновре-

менной защиты их от огня), выбирая более плоские камни и пытаясь даже перекрыть свод (рис. 68а слева). Теплоотдача «от дыма» стала доминирующей в фильтрующих насыпных каменках чёрных и белых бань (рис. 68б). Такие фильтрующие каменки стали родоначальником широчайшего класса промышленных технологических аппаратов насыпным зернистым слоем, подробно изучавшихся в самых разных областях техники и для сжигания топлива, и для сушки, и для проведения химических реакций (М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем, Ленинград: Химия, 1968 г.).

Фильтрующие каменки («камни в огне») сейчас преимущественно используются лишь в элитных общественных и любительских дачных банях, имеют сложные особые конструкции (М.А.Соколов). Чугунные решётки при высоких температурах могут коробиться, поэтому камни лучше укладывать на дырчатый свод из огнеупорного кирпича. Разогре-

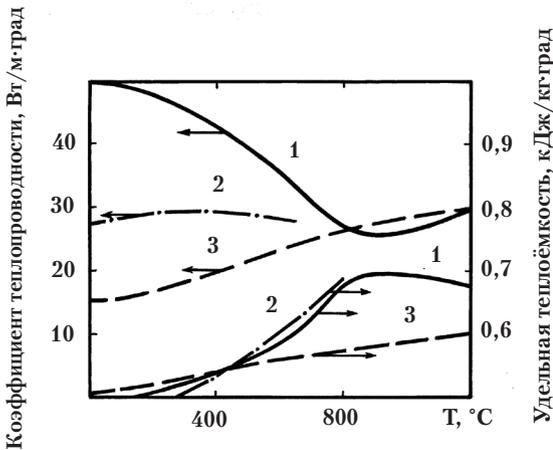


Рис. 70. Температурные зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоёмкости стали: 1 — углеродистой стали Ст 3, 2 — жаростойкой хромистой стали (11–13% хрома), 3 — нержавеющей стали 1X18H10T (15–22% хрома, 8–15% никеля).

тые дымовые газы имеют высокую вязкость (рис. 69). С целью снижения сопротивления, нижние слои фильтрующей каменки, контактирующие с высоковязкими газами, выкладываются из более крупных камней, чтобы каналы между камнями были наиболее широкими. Как мы уже отмечали, газодинамическое сопротивление одного широкого отверстия (канала) намного меньше, чем сопротивление множества мелких отверстий (каналов) даже в том случае, если общее проходное сечение остаётся неизменным. Нижние камни и подвергаются наибольшей тепловой нагрузке, поэтому их большой размер предупреждает их быстрый перегрев (благодаря высокой тепловой инерции таких камней и повышенному коэффициенту лучистой теплопроводности каменки из таких камней). Напомним к тому же, что нагревающиеся камни, уложенные в распор, при термическом расширении способны разрушить корпус каменки.

С целью сохранения чистоты камней в современных банных печах каменку греют через разделительную металлическую нагревательную, отопительную, жаровую плиту (рис. 68в). В этом случае дымовым газам не приходится проходить через камни, и вопрос о необходимости снижения газодинамического сопротивления каменки не возникает. Если над свободной от камней металлической плитой образуется мощный конвективный воздушный поток — вертикальная струя (рис. 52), то насыпка камней гасит перемещения воздуха, особенно при высоких температурах, когда вязкость воздуха велика (рис. 69). Для более эффективного нагрева камней их зачастую заключают в ёмкость из стали, которая со всех сторон омывается дымовыми газами (рис. 68г). Такая конструкция каменки уже может оснащаться теплозащитной крышкой.

Самым горячим элементом каменки является её дно (дно металлического контейнера для камней). В связи с этим, напомним, что тепло-

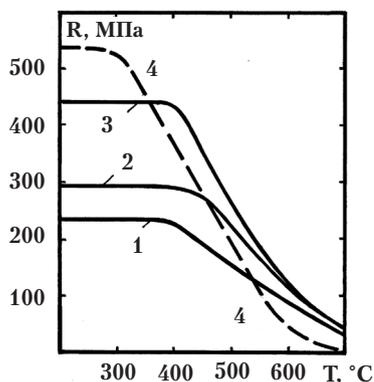


Рис. 71. Снижение предела текучести сталей в зависимости от температуры их нагрева в напряжённом состоянии: 1 – сталь горячекатанная Ст. 3 по ГОСТ 5521-76, 2 – сталь горячекатанная Ст.5, 3 – сталь горячекатанная Ст. 5, упрочненная вытяжкой, 4 – обыкновенная закаленная арматурная проволока класса В-I.

проводность металлов очень высока: в 10 раз выше теплопроводности камней и в 1000 раз выше теплопроводности воздуха. С увеличением температуры теплопроводность металлов снижается, но незначительно, а теплоёмкость возрастает до уровня теплоёмкости камней (рис. 70). Это значит, что массивное дно контейнера каменки может обладать существенной долей теплоаккумулирующей способности всей каменки в целом. Более того, каменка, набранная из стальных пластин или выполненная в виде единого стального сердечника, погружённого в пламя, является самой легкопрогреваемой и самой теплоёмкой из всех возможных каменок того же объёма.

Металлическое дно контейнера каменки (плита, поддон) нагревается под камнями до более высоких температур, чем свободное (без камней), так что корпус контейнера каменки должен изготавливаться из жаростойких металлов, причём с достаточной толщиной для предотвращения прогибов под тяжестью каменки при высоких температурах (И.Ф.Курин, Патент РФ №30420). В связи с этим отметим, что все стальные изделия теряют прочностные свойства при высоких температурах (размягчаются, «плывут»), что наряду с термическим расширением используется в металлообработке, в частности, в кузнечных производствах. Факт уменьшения прочности (сопротивления) наиболее ярко проявляется в случае термически упрочненных (закаленных) сталей (в частности, арматурной), претерпевающих при 200–550 °C отпуск, а при 850 °C отжиг (рис. 71). Поскольку сварка легированных жаростойких (в первую очередь, хромистых) сталей возможна лишь в заводских условиях, в быту самостоятельно изготавливаются печи из горячекатаной стали Ст. 3, надёжно работающей лишь до 400 °C. При этом, если свободные от нагрузки стенки печи из стали Ст. 3 вполне надёжны при разогреве докрасна даже при толщинах 2 мм, то дно крупной каменки во избежание прогибов следует делать толщиной не менее 5 мм (лучше 10 мм или усилить рёбрами жёсткости).

Прогибы стали за счёт её размягчения наносят намного больший вред, чем коррозия (прогары), но ещё опасней коробления за счёт термического расширения стали. Этот вопрос важен и для контейнеров каменок, и для стенок топливника. Каждый, кто имел дело с газовой или электрической сваркой, знает, что металл при нагреве «ведёт». Так, направляя пламя газовой горелки в центр стального листа, можно видеть, как металл, расширяясь, выгибается «горкой». Если металл охладить строго в той же последовательности, в которой он был нагрет, то он «сядет» без деформации. Но если при охлаждении последовательность не соблюдена (а это случается практически всегда, например, при проходе сварочной газовой горелкой шва или при прогорании рядом с металлом полена от одного конца до другого), то металлический лист коробится, становится волнистым. Особо неприятны последствия с образованием резких изломов (как при смятии бумаги), поскольку из-за хрупкости металла могут образоваться сквозные трещины, которые со временем в процессе эксплуатации только расширяются, в том числе и за счёт прогорания металла. Чем тоньше лист металла, тем более неоднородно он может быть нагрет, а затем охлаждён. При толщине листа металла, например 1 мм, топливник или близко расположенный к углям контейнер для камней наверняка рано или поздно искорёжится и треснет, даже если металл будет выбран жаростойкий, например, хромистая с (11–13)% Cr или хромоникелевая с (15–22)% Cr и (8–15)% Ni (в частности, известная нержавеющая сталь 1X18H10T). При толщине металла 2 мм коробление металла будет наблюдаться наверняка, но трещин можно избежать, а при толщине металла 3 мм и более состояние металлических стенок топливника печи может оставаться удовлетворительным, особенно если стенки будут сварены с рёбрами жёсткости.

Куча (слой) камней является неоднородным теплопередающим материалом, состоящим из разных фаз – твёрдой и газовой. Поэтому понятие коэффициента теплопроводности, строго говоря, можно ввести лишь при условии малости размера камней по сравнению с характерным размером всей каменки в целом и по сравнению с характерными расстояниями существенных изменений температуры в каменке. Тем не менее, понятие теплопроводности складывается из суммы единичных актов теплопередачи, и может помочь при анализе любой каменки.

В отличие от другого материала – минеральной ваты, каменка как наполнитель содержит много твёрдой фазы: средняя пористость каменок (соотношение объёма пустот к общему объёму) составляет 50%, в то время как пористость минеральных ват достигает 98%. Поэтому, если в минеральной вате твёрдая фаза (нити камня или стекла) создаёт лишь «мостики холода», пропускающие примерно столько же тепла, сколько и воздух,

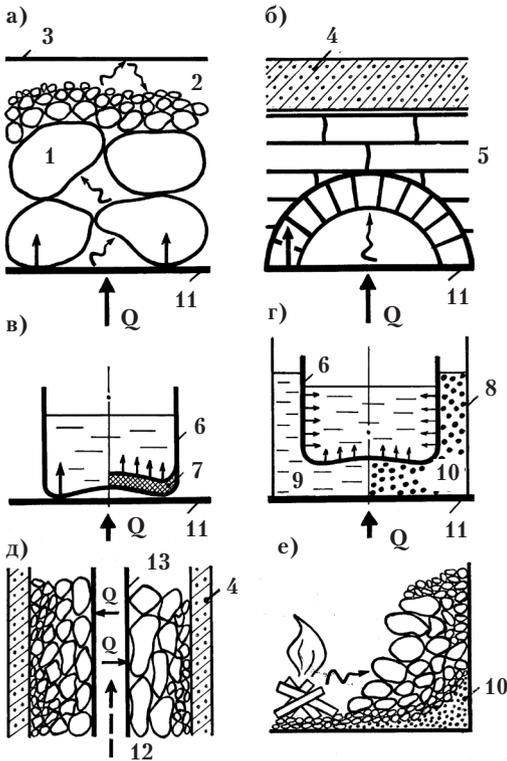


Рис. 72. Частные варианты теплообменивающихся объектов: а – куча камней (каменка) на нагретой металлической плите, прямые сплошные стрелки – кондуктивные потоки тепла через точки контакта, пунктирные – потоки лучистого тепла, б – каменная (кирпичная) сплошная кладка со сводами (полостями), в – кастрюля с водой на раскaлённой металлической плите, слева – тонкое дно, справа – толстое дно, г – кастрюля с водой в водяной бане (слева) или в сухой песчаной бане (справа), д – каменка, заложенная между жаровой трубой и утеплённым корпусом, е – каменка, нагреваемая лучистым теплом от костра. 1 – камни, 2 – мелкие камни, 3 – отражающая поверхность, 4 – теплоизоляция, 5 – монолитная кладка, 6 – кастрюля с водой, 7 – толстое дно кастрюли (или алюминиевое дно), 8 – сосуд (контейнер) для водяной или песчаной бани, 9 – водяная баня (вода как теплопередающий агент), 10 – песчаная баня (песок сухой как теплопередающий агент), 11 – раскaлённая металлическая плита (конфорка электроплиты), Q – тепловой поток от пламени или ТЭНа для разогрева плиты, 12 – дымовые газы, 13 – жаровая труба.

то в каменке твёрдая фаза (куски камней) являются основной средой теплопередачи, пропускающей в сто раз больше тепла, чем воздух. Действительно, многочисленные экспериментальные измерения теплопередачи через зернистые слои в химических аппаратах показали, что вакуумирование (удаление воздуха) практически не влияет на величину теплового потока через зернистый слой. Это означает, что тепловой поток осуществляется в основном кондуктивно через точки контакта зёрен (см. прямые сплошные стрелки на рис. 72а). Ситуация аналогична теплопередаче в сплошную кладку (монолит) через столбики, удерживающие своды (рис. 72б). Бытовым доказательством передачи тепла преимущественно через точки контакта является неоднородность подгорания пищи в кастрюлях с тонким дном: локальный тепловой поток через точку касания дна кастрюли с плитой вызывает вскипание воды именно в этой точке с по-

то в каменке твёрдая фаза (куски камней) являются основной средой теплопередачи, пропускающей в сто раз больше тепла, чем воздух. Действительно, многочисленные экспериментальные измерения теплопередачи через зернистые слои в химических аппаратах показали, что вакуумирование (удаление воздуха) практически не влияет на величину теплового потока через зернистый слой. Это означает, что тепловой поток осуществляется в основном кондуктивно через точки контакта зёрен (см. прямые сплошные стрелки на рис. 72а). Ситуация аналогична теплопередаче в сплошную кладку (монолит) через столбики, удерживающие своды (рис. 72б). Бытовым доказательством передачи тепла преимущественно через точки контакта является неоднородность подгорания пищи в кастрюлях с тонким дном: локальный тепловой поток через точку касания дна кастрюли с плитой вызывает вскипание воды именно в этой точке с по-

следующим обезвоживанием пищи и подгоранием (рис. 72в). Чтобы уменьшить локальность теплового потока, дно кастрюли следует делать высокотеплопроводным, дабы предотвратить повышение температуры дна кастрюли в какой-нибудь одной локальной точке и «размазать» тепловой поток равномерно по всему дну. Это достигается использованием высоко-теплопроводного алюминия для изготовления кастрюль (например, для кипячения молока), толстых доньшек стальных и стеклянных кастрюль, водяной или песчаной бани (рис. 72г). Напомним, что в химической технологии банями называют устройства для однородного нагрева.

С повышением температуры плиты выше  $100^{\circ}\text{C}$  начинают играть роль лучистые потоки тепла. Так, при  $700^{\circ}\text{C}$  конфорка электроплиты со стандартным диаметром 0,19 м излучает 1,4 кВт тепла при удельной мощности излучения  $50 \text{ кВт/м}^2$ . Но стоит поставить на такую раскалённую докрасна конфорку кастрюлю с холодной водой, тотчас температура конфорки резко снизится, что видно визуалью по исчезновению красного свечения конфорки под кастрюлей. Поскольку дно кастрюли не может повысить лучистые потери конфорки, понижение температуры конфорки можно объяснить лишь резким увеличением кондуктивных теплопотерь за счёт контакта раскалённой конфорки с холодным дном кастрюли. Действительно, несмотря на крайне низкую теплопроводность неподвижного воздуха  $0,024 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ , перепад температур  $700^{\circ}\text{C}$  в зазоре 0,1 мм обеспечивает кондуктивный поток тепла через воздух  $168 \text{ кВт/м}^2$ , что намного превышает лучистый поток тепла  $50 \text{ кВт/м}^2$ . Аналогичная картина возникает в случае холодных камней на раскалённой плите, причём чем плотней прижимаются к плите холодные камни, тем сильнее, естественно, они отбирают тепло у плиты (рис. 72а). Вместе с тем, отобрать у плиты тепло с мощностью  $50\text{--}100 \text{ кВт/м}^2$  камень может только за счёт накопления этого тепла внутри себя (то есть за счёт подъёма своей температуры), поскольку пропустить через себя такой тепловой поток камень способен лишь при перепадах температур внутри себя несколько сот градусов при размере камней 3–5 см. Другими словами, не только вся каменка постепенно прогревается слой за слоем, но и сами камни при больших тепловых потоках  $50\text{--}100 \text{ кВт/м}^2$  прогреваются внутри себя слой за слоем. Пока камни нагреваются, они способны поглотить мощный тепловой поток от плиты за счёт собственного теплонакопления, но когда камни нагреются, они уже будут играть роль теплоизолятора. При этом, металлическая плита под каменной рано или поздно может нагреться до более высоких температур, чем в том случае, если камней на ней совсем не было бы, поскольку насыпка камней может проводить меньше тепла, чем восходящая конвективная струя над каменной. Таким образом, если на раскалённую плиту, нагреваемую снизу пламенем до

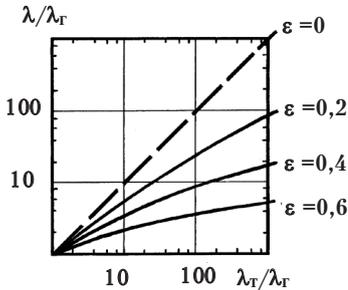


Рис. 73. Коэффициент кондуктивной теплопроводности зернистого (песчаного, кускового каменного или металлического) слоя  $\lambda$  в зависимости от коэффициентов теплопроводности материала твёрдых зёрен (кусков)  $\lambda_G$  и газа  $\lambda_G$  при различных пористостях слоя  $\epsilon$ , равных отношению объёма пустот (объёма газовой фазы) к общему объёму слоя (сумме объёмов твёрдой и газовой фаз).

температуры  $T_0$ , набросать камни, то плита сначала охладится, а затем, по мере прогрева камней, нагреется до температур, может быть, даже значительно более высоких, чем исходная температура плиты  $T_0$ . Собственно, в этом заключается вся суть назначения каменки – накопить побольше тепла и удерживать его до момента поддачи, когда вновь возникает нестационарный режим, но уже не нагрева, а охлаждения каменки за счёт испарения воды (см. ниже).

Таким образом, динамика нагрева (или охлаждения) раскалённой плиты под каменкой будет определяться в каждый конкретный момент соотношением теплопритока снизу (от пламени) и теплооттока вверх через каменку в помещение. Методики подобных нестационарных расчётов сложны и доступны лишь для упрощённых моделей. В банной практике численные оценки никогда не используются, тем более в дачных банях, хотя бы потому, что каменки всё больше превращаются ныне из технологических узлов в чисто украшательный элемент бань и самих печей. В рядовых условиях дачник пользуется интуитивными понятиями, например, соображениями, что чем более плотно прижаты между собой камни, тем быстрее прогревается весь объём каменки в контейнере (на плите), в отличие от фильтрующей каменки, где камни должны быть уложены как можно более рыхло для свободного прохода дымовых газов.

Дачник чаще всего непосредственно обращается к каменке лишь при поддачах, когда каменка уже полностью разогрета. Поэтому дачника больше интересуют не особенности её прогрева во времени, а сведения о её возможном конечном температурном состоянии в условиях её полного прогрева. Такая стационарная задача намного проще для оценок и более наглядна для понимания, чем нестационарная: достаточно знать единственный параметр – коэффициент теплопроводности каменки.

При низких температурах до  $100\text{--}200^\circ\text{C}$ , когда роль лучистого теплопереноса не является определяющей или существенной, кондуктивная теплопроводность зернистого слоя определяется пористостью (порозностью) слоя  $\epsilon$  (отношением объёма пустот в слое к общему объёму слоя).

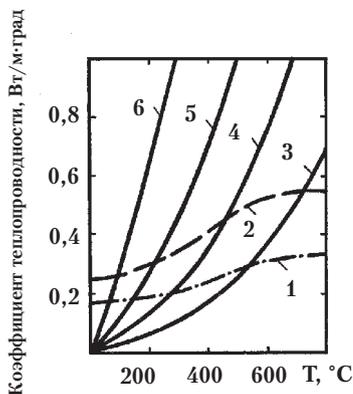


Рис. 74. Температурные зависимости коэффициента теплопроводности зернистого слоя с пористостью  $\varepsilon=0,5$ : 1 — кондуктивная теплопроводность каменки из кусков базальта, 2 — кондуктивная теплопроводность каменки из кусков углеродистой стали, 3–6 — лучистые теплопроводности каменки из кусков материала любой породы (со степенью черноты, равной единице) с размером кусков (зёрен) 0,5 см (кривая 3), 1 см (кривая 4), 2 см (кривая 5), 5 см (кривая 6). Истинная теплопроводность слоя складывается из кондуктивной и лучистой составляющих.

При обычной пористости слоя  $\varepsilon = 0,5$  (объём пустот составляет 50%) теплопроводность слоя камней составляет примерно 10% от теплопроводности камней (2–4) Вт/м·град (рис. 73), то есть равна примерно теплопроводности древесины (0,2–0,4) Вт/м·град (рис. 74). Если в качестве камней использовать металлические куски (болванки, чушки, шары и т. п.), имеющие теплопроводность в 10 раз большую, чем камни, то теплопроводность слоя кусков металла составит примерно (0,3–0,5) Вт/м·град (рис. 74), что соответствует теплопроводности пустотного кирпича. Ясно, что такие каменки являются фактически теплоизоляторами, внешними утепляющими облицовками печи, повышающими температуру металлической стенки печи, к которой они прикасаются.

Пористость каменок на уровне  $\varepsilon=0,5$  является наиболее типичной. Но при специальной форме элементов (зёрен) каменки пористость может быть уменьшена теоретически до нуля, и теплопроводность каменки в таком случае была бы равна теплопроводности материала элементов (зёрен) каменки. Например, если камни для каменки изготовить из металла в виде одинаковых кубиков, то аккуратной послойной укладкой или тщательной утряской можно получить плотную упаковку, именно теплопроводность на уровне монолитного металла. Такая технология используется в ряде технологических аппаратов, в частности при заполнении ядерных реакторов графитовыми блоками (кирпичами). Можно использовать также плотную упаковку сферических элементов, применяемую, в частности, в ТВЭЛах (тепловыделяющих элементах) ядерных реакторов или рецептурах ракетных топлив. Напомним, что шарики одинакового размера утряской упаковываются с пористостью (пустотностью) на уровне 0,24. Если в пустоты между шариками поместить шарики меньшего размера, то пористость ещё больше уменьшится. Подобрав таким способом необходимый фракционный состав шариков, можно теоретически добиться

очень низкой пористости засыпки, высокой её теплоёмкости и теплопроводности. Впрочем, останавливаемся мы здесь на этом в чисто постановочном плане, чтобы показать, что технология каменок для бань может совершенствоваться (при необходимости) бесконечно.

При высоких температурах плиты (выше 100–200°C) всё большую роль начинает играть лучистый теплоперенос. Обычно камни состоят из камней со степенью черноты, близкой к единице в ИК-области (хотя мыслимы камни и из блестящих полированных металлических «каменей»). В таком случае тепловой поток лучистой энергии внутри каменки от слоя с температурой  $T_1$  к слою с близкой температурой  $T_2$  равен  $q_{\text{луч}} = \sigma T_1^4 - \sigma T_2^4 = \sigma T_1^3 (T_1 - T_2) = \sigma T_1^3 a \Delta T / \Delta x = \lambda_{\text{луч}} \Delta T / \Delta x$ , где  $a$  – характерная длина пробега излучения, принимаемая условно равной среднему линейному размеру пустот между камнями в каменке,  $\lambda_{\text{луч}} = \sigma T_1^3 a$  – коэффициент лучистой теплопроводности. Чем более плотно упакованы камни, тем меньше коэффициент лучистой теплопроводности, тем меньше лучистые потоки (но тем больше теплопроводность – кондуктивные потоки тепла внутри каменки), так что в рыхлых слоях лучистый поток максимален. При ломаной форме камней и пористости каменки на уровне  $\varepsilon = 0,5$  размер пустот примерно равен размеру камней. Сопоставление лучистой и конвективной составляющих (рис. 74) показывает, что при пористости каменки  $\varepsilon = 0,5$  коэффициенты кондуктивной и лучистой теплопроводности при температуре 600°C сравниваются при размере камней 0,5 см, а при более крупных камнях доля лучистого теплопереноса становится преобладающей. Так, при размере камней 5 см лучистая теплопроводность при 600°C сравнивается с теплопроводностью материала камней (то есть с теплопроводностью каменки максимально плотной упаковки).

Оптимальные свойства нефилтрующих каменок достигаются при высокой теплопроводности внутренних глубинных слоёв (что обеспечивает равномерность температурного поля внутри каменки) и при низкой теплопроводности внешних слоёв (что обеспечивает теплоизоляцию каменки). Поэтому внутренние слои нефилтрующих каменок должны иметь максимальную упаковку и изготавливаться из металлических чушек (или с применением металлических чушек). Если высокая степень упаковки достигнута быть не может, например, из-за ломаной формы камней, то внутренние слои каменки должны состоять из крупных камней, чтобы выровнять температурное поле за счёт высокой лучистой теплопроводности. Внешние слои каменки следует выкладывать как можно более рыхло, причём из камней как можно более мелкого размера, чтобы уменьшить и кондуктивные, и лучевые теплопотери открытой каменки. Дальнейшее снижение теплопотерь возможно с применением отражающих (рис. 72а) и утеплённых (рис. 72б) крышек (а также контейнеров-термосов). Наи-

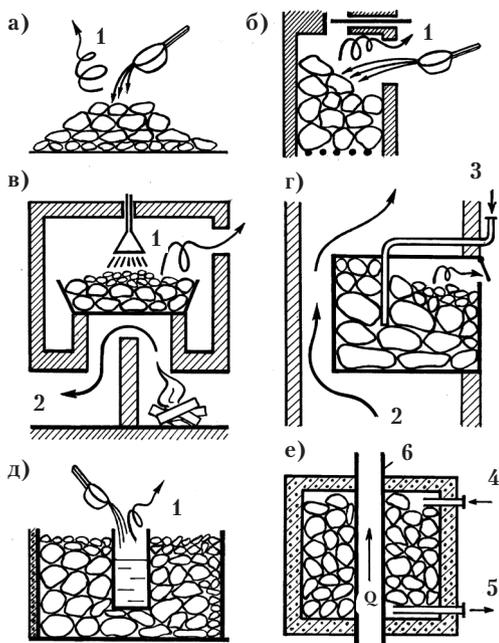


Рис. 75. Приёмы подачи воды в каменку: а – полив из ковша, б – заброс воды взмахом ковша, в – полив из душевого рассекателя, г – подача струёй внутрь (или на дно) каменки, д – кипячение воды в металлическом стакане, погружённом в каменку, с получением пара (вариант, распространённый в электрокаменках для саун), е – подогрев водяного пара в каменке. 1 – потоки пара (спиральные стрелки), 2 – дымовые газы, 3 – дозированный ввод воды под давлением, 4 – ввод пара, 5 – вывод подогретого и осушённого пара, 6 – жаровая труба.

песком (лучше лёгким, типа перлита или вспученного вермикулита), но удержание этой песочной засыпки при поддачах требует использования сложных фильтрующих пар систем. Всё это относится и к каменкам, нагреваемым от вертикальной стенки (рис. 72д, е). При этом нагрев камней, лежащих на плите 11, в отличие от нагрева воды и воздуха, начинается не сверху (где накапливается горячая вода или тёплый воздух), а снизу, поскольку конвективные движения воздуха в каменке затруднены.

Системы подачи воды в каменки могут мыслиться совершенно по-разному. Наиболее распространён ручной метод полива камней из ковша (рис. 75а), в том числе «забросом» воды в дверку закрытой каменки (75б). В крупные каменки городских бань вода могла подаваться из водопровода через душевой рассекатель (рис. 75в). Подача воды через погружённую трубку внутрь или даже на дно каменки сопровождается газодинамическими ударами (выбросами воды через трубку), поэтому должно проводиться под давлением в водопадающей магистрали или ручным мембранным (поршневым) насосом (рис. 75г), в том числе и через распылитель (форсунку). При подаче фактически протекают два последовательных процесса: сначала при вскипании воды образуется водяной пар с температурой  $100^{\circ}\text{C}$ , а затем этот пар нагревается (перегревается) при атмосферном давлении до повышенных температур ( $100\text{--}700^{\circ}\text{C}$  при фильтрации

лучшие теоретические результаты по теплоизоляции можно было бы получить засыпкой сверху всей каменки

через слой раскалённых камней. Поэтому могут мыслиться два отдельных аппарата: водяной кипятильник (парогенератор), погружённый в каменку (рис. 75д), и подогреватель пара (рис. 75е). Подогреватель пара может запитываться от отдельной магистрали сжатого пара от специального парового котла и выполнять при этом роль осушителя пара в смысле удаления из него конденсата (брызг кипятка и тумана).

Передача тепла из камня в компактную воду или в газообразный водяной пар в любом случае происходит за счёт охлаждения камня. Но скорость нагрева воды, равная скорости охлаждения камня, может быть разной. Вода в стакане (рис. 75д) кипит значительно менее интенсивно, чем при поливе камней (75а). Все знают о «хлопке» пара при поддачах на хорошо раскалённые камни, и конечно же, получить такие хлопки при погружении сосуда с водой в каменку невозможно. Причина этого факта становится ясной, если представить, что сосуд с водой (рис. 75д) представляет собой по существу один из камней каменки. В таком случае скорость испарения воды в сосуде будет определяться скоростью передачи тепла от камня к камню (от горячего к холодному), или от горячего камня к холодной поверхности плиты, или от горячей поверхности плиты (конфорки) к холодному камню. При температуре  $700^{\circ}\text{C}$  эта теплопередача имеет мощность порядка  $(50\text{--}100)$  кВт/м<sup>2</sup> (см. выше). При поливе же камня водой скорость испарения воды будет определяться скоростью передачи тепла внутри камня, которая может составлять гигантские величины (сотни мВт/м<sup>2</sup>), особенно в первые мгновения.

Охлаждение в воде отдельного камня определяется известным дифференциальным уравнением в частных производных нестационарной теплопроводности  $dT/dt = a d^2T/dx^2$ , где  $a = \lambda / \rho c_p$  – коэффициент температуропроводности тела. Решения этого параболического уравнения в простейших случаях (пластина, цилиндр, шар) приводятся во всех учебниках по теплообмену. Напомним, что темп охлаждения тела является экспоненциальным  $T = T_0 \exp(-at/R^2)$ , причём скорость охлаждения быстро увеличивается с ростом коэффициента теплопроводности тела  $\lambda$  и уменьшением размера тела  $R$ . То есть чем меньше по размеру камни, тем быстрее они охлаждаются, а значит, и быстрее отдают тепло на испарение воды. Мелкие камни, а также камни с большой теплопроводностью, взрывным образом испаряют попавшую на них воду, но и быстро охлаждаются. Крупные камни, а также камни с малой теплопроводностью, медленно («мягко») испаряют воду, но зато долго. В русских паровых банях предпочитают взрывное испарение (с хлопком – ударной волной), а в современных финских саунах зачастую предпочитают мягкий пар с камнями с малой теплопроводностью (талькохлоритами).

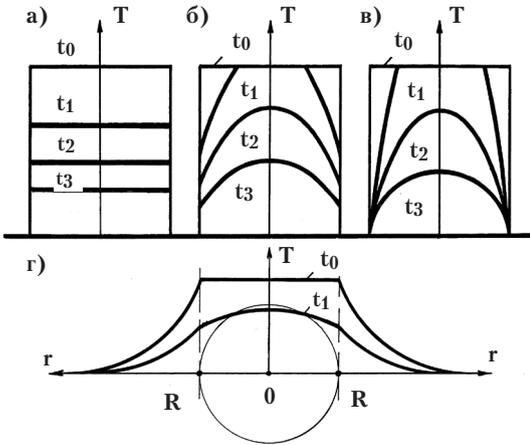


Рис. 76. Временной ход изменения поля температур в камне (в форме шара) при различных скоростях охлаждения: а – при очень малых значениях критерия Био, б – при критерии Био порядка единицы, в – при очень больших значениях критерия Био, г – сопоставление внутреннего и внешнего распределения температур в шаре, падение температуры вне шара определяет коэффициент внешней теплопередачи  $\alpha$ ,  $t_0$  – начальный момент времени,  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  – последовательные моменты времени,  $R$  – радиус шара.

Взрывные испарения воды можно получить и на крупных камнях, но тогда надо использовать малые поддачи (плещут воду по чуть-чуть). Дело в том, что для получения больших скоростей испарения вовсе не обязательно быстро охлаждать камни целиком. Можно охлаждать лишь внешние слои, создавая в них большие градиенты температуры. Пространственное распределение температуры внутри камня определяется в первую очередь критерием Био  $Bi = \alpha R / \lambda$ , где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи от камня во внешнюю среду (в том числе и других камней),  $R$  – размер камня,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала камня. Коэффициент теплопередачи определяется из соотношения  $Q = \alpha(T_k - T_0)$ , где  $Q$  – тепловой поток из камня,  $T_k$  и  $T_0$  – температуры поверхности камня и окружающей (внешней) среды. В случае воздуха  $\alpha = 10$  Вт/м<sup>2</sup>-град (см. раздел 5.3), и критерий Био для охлаждающихся в воздухе камней всегда много меньше единицы. В случае воды  $\alpha = 1000 - 10000$  Вт/м<sup>2</sup>-град, и критерий Био для охлаждающихся в воде камней всегда много больше единицы. При охлаждении раскалённых камней в воде фактически имеем закалку изделия в жидкости, когда тепловые потоки достигают миллионов Вт/м<sup>2</sup> вплоть до наступления кризиса пузырькового кипения. В этих условиях температура поверхности камней мгновенно снижается с сотен градусов Цельсия до температуры воды и затем остаётся постоянной и равной температуре кипения воды.

Критерий Био представляет собой отношение коэффициентов внешней и внутренней теплопередач. При больших  $Bi$  перепады (градиенты) температуры внутри камня большие, при малых  $Bi$  перепады температуры в камне маленькие (рис. 76). При больших  $Bi$  происходит быстрое охлаждение поверхностных слоёв камня и их термическое сжатие, вследствие чего мо-

жет наступить хрупкое разрушение внешних слоёв с растрескиванием и даже с разлётом осколков. В то же время из рисунка 76в видно, что наибольшие градиенты температуры наблюдаются лишь в первые мгновения охлаждения. Поэтому для образования хлопков (по крайней мере на крупных камнях) поддачи должны быть по возможности малыми (при количествах воды не более 0,1% от массы каменки). После быстрого выравнивания поля температуры в камне поддача может быть вновь повторена.

Массив каменки обычно содержит именно крупные камни, обладающие, как мы установили, меньшей скоростью охлаждения в воде, чем мелкие камни (песок). Поэтому для обеспечения высокой скорости парообразования крупные камни располагают внизу (в основании) каменки, чтобы они прогревались до более высоких температур и запасали больше тепла. Кроме того, ломаная форма камней создаёт условия повышенной теплоотдачи с острых граней, а также, из-за повышенной площади поверхности теплообмена. Ломаная форма камней (и особенно металлических чешуек) приводит с одной стороны к уменьшению общего теплосодержания каменки из-за повышенной пористости (порозности, пустотности) слоя, а с другой стороны к повышению мощности теплоотдачи.

Пониженная скорость парообразования на крупных камнях может быть пояснена простейшими житейскими представлениями. Ясно, что 1 кг раскалённого песка, высыпаемого в таз с холодной водой, остынет мгновенно и тут же отдаст своё тепло в воду. А если в таз с холодной водой опустить раскалённый булыжник с той же массой 1 кг и с той же температурой, то он будет остывать долго. В этом можно убедиться, ощупывая булыжник рукой под водой. А это значит, что одно и то же количество тепла поглощается водой за разное время, то есть с разной мощностью (интенсивностью). Аналогично, крупный кусок мяса прогреется (прожарится) на сковороде медленнее, чем мелкие кусочки. Всё это обусловлено тем, что с ростом размера тела  $R$  объём тела (то есть масса) растёт как  $R^3$ , а поверхность тела (то есть площадь теплопередачи) лишь как  $R^2$  (значительно медленнее).

Моделировать поведение воды на поверхности камней можно столь же житейски, наблюдая, что происходит с водой на обезжиренной сковороде. Если сковородка холодная, то капля воды стремится смочить поверхность сковородки, растечься. Если сковородка горячая, то капля кипит (шипит) неподвижной каплей. Если сковородка раскалённая, то наступает кризис кипения, капля с хлопком касается сковородки, а затем с шипением разбрасывая брызги, начинает «бегать» по сковородке отталкиваясь от неё паром (паровой подушкой). Точно так же вода, льющаяся на раскалённую каменку, разбрызгиваясь в капли и струи, стремится «проскочить» вниз и зачастую, особенно в электрокаменках с ТЭ-

Нами, «проваливается» через всю каменку на пол или дно контейнера. Если же каменка состоит из раскалённых мелких камней (песка), то капля с хлопком «забрав» тепло из комка песка, тотчас охлаждает весь комок и смачивает его, после чего этот мокрый комок как единая частица (агрегат) медленно подсыхает, забирая тепло из соседних песчинок. Так что и в раскалённом состоянии песок выполняет роль впитывающего агента.

В быту часто встречается расхожее мнение, что пар из каменки состоит (складывается) из «свежего жгучего» пара от хорошо раскалённых камней и из «душного холодного» пара от камней недостаточной горячих, причём от последнего надо избавляться. Конечно же, пар из двух паров состоять не может. В каменке при вскипании воды в любом случае сначала образуется пар с температурой 100°С, а затем этот пар в процессе фильтрации через горячие камни может нагреваться до температур выше 100°С, перемешивается, усредняется и с единой температурой поступает в парилку. Так что этот пар может быть либо «мягким», либо «крутым», но «душным» он может стать лишь в объёме бани при «неудачном» смешении с воздухом, когда, не успев достигнуть потолка, конденсируется по пути в туман.

В качестве камней в каменках используются натуральные камни, синтетические спечённые материалы и металлические тела. В рядовых банях используют булыжник (окатанные камни округлой формы среднего размера), чаще всего отбираемые из песчано-гравийных слоёв, в том числе речных. Сразу отбраковывают светлые камни осадочных пород (мрамор, известняки, фосфаты и др.), особенно пористые – они рассыпаются (с выделением воды, углекислого газа и др.) при температурах 400–700°С. Нежелательны твёрдые хрупкие с явными сколами тёмные (кремни) и крупнокристаллические (граниты) камни, хрупко разрушающиеся при резком охлаждении (в том числе с разлётом осколков). Отобранные камни нагревают в костре и в раскалённом состоянии проверяют на термостойкость обливанием водой из ведра. Выдержавшие резкое охлаждение камни проверяют затем уже в составе каменки.

В последнее время рядовому покупателю стали доступны колотые камни вулканических пород (базальты, диабазы, габбродиабазы и др.) из отечественных каменоломен по цене (0,2–0,5) дол. США за 1 кг, а также схожие по составу и свойствам вулканыты из Финляндии по цене порядка 1 дол. США за 1 кг. Для представительских бань предлагаются термостойкие с температурой плавления 1060–1100°С, выдерживающие быстрые охлаждения, очень твёрдые (родственные нефриту) жадеиты (пироксены) серо-зелёного цвета по цене (5–8) дол. США за 1 кг для «взрывного» испарения воды и мягкие, жирные на ощупь, малотеплопроводные талькохлориты (по-фински «туликиви» или «везукиви» – гор-

печные камни) для «мягкого» испарения воды. К сожалению, как часто бывает, рекламные предложения не всегда соответствуют свойствам продаваемых природных камней, сильно различающихся от партии к партии, например, по твёрдости при резании:

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоёмкость, кДж/кг-град	Коэффициент теплопроводности, Вт/м-град	Источник
Гранит, гнейс и базальт	2800	0,88	3,49	СП23-101-2000
Жадит NaAl [Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	3200–3500	0,88	2,3–3,6	ЗАО «Хакас-интерсервис»
Талькохлорит (тальк 40-50%, хлорит 5-8%, магнезит 40-50%)	2980	0,98	6(!)	ООО «Туликиви»
	2800–3000	0,85–1,2 (50–400°С)	4–1 (20–1000°С)	ООО «Энерго-ресурс»
	2900	1,1	0,58	ООО «ТУ-ЛИКАНО»
Кварц плавленный (SiO <sub>2</sub> )	2200	0,73	1,01	Сертификат

Талькохлориты имеют слоистую структуру (как графит и тальк), что и обуславливает их «жирность». Теплопроводность талькохлорита вдоль слоёв намного превышает теплопроводность поперёк слоёв, входящих в состав талькохлорита светло-серый тальк Mg<sub>3</sub> [Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>][OH]<sub>2</sub> также является очень мягким (твёрдость равна единице), жирным на ощупь материалом. Плотный природный тальк называется жировиком или стеатитом, используется для изготовления точёных каменных изделий. Хлориты – слюдоподобные минералы серобурозелёного цвета. При 500°С магнезит MgCO<sub>3</sub> превращается в периклаз MgO, а при 800°С тальк теряет связанную воду: талькохлорит превращается из мягкого зеленоватого в твёрдый бурый камень (иногда расслаивающийся) с температурой плавления около 1600°С.

Значительно более качественными как по физико-химическим свойствам, так и по стабильности качества являются синтетические камни. В основном это высокоглинозёмистые  $Al_2O_3$  и кремнезёмные  $SiO_2$  спечённые материалы (керамические огнеупоры), издавна имевшие в нашей стране промышленную базу, но специально для бань не производившиеся. Среди дачников это наиболее ходовой материал для каменок в виде обломков кварцевых или корундовых изделий и особенно в виде высоковольтных фарфоровых электроизоляторов или их обломков. Основным недостатком спечённых материалов – сравнительно низкая плотность (из-за пористости) и, как следствие, сравнительно низкая удельная объёмная теплоёмкость и теплопроводность, что более подходит для «мягкого» парообразования.

Для мощного взрывного образования пара наиболее пригодны металлические тела – чушки, лом, обрезки проката (лучше прутка), мелкие детали, шары и ролики подшипников и т. п. В литературе часто утверждается, что металлические каменки имеют малую теплоёмкость, имея в виду, видимо, массовую удельную теплоёмкость, в то время как для каменок важна объёмная удельная теплоёмкость, как раз наибольшая у металлов. Основным недостатком раскалённых металлов (да и камней тоже) – образование брызг горячей воды при поддачах, так что надо загоразживаться экраном или засыпать металл мелкими камнями. Второй недостаток металлов – низкая коррозионная стойкость (окисление, ржавление). Поэтому наиболее распространено применение чугуна в виде чушек, лома колосниковых решёток, деталей крепежа железнодорожных рельсов и т. п. Ещё во времена Петра I в банях применяли чугунные ядра и разный чугунный бой (лом) (бани-чугунки). Чугун достаточно стоек, выдерживает несколько сот поддач, после чего чугун постепенно растрескивается, расширяется с образованием трещиноватых каверн за счёт высокотемпературного взаимодействия углерода, в том числе связанного (в виде фазы карбида железа), с водяным паром.

## 5.6. Древесина как топливо

Дрова всё ещё остаются основным видом топлива для дачных бань, а в любительских банях являются непременным элементом антуража. Дрова достаточно экологичны: в отличие от каменного угля и нефти древесина при сжигании не образует сернистых соединений, но по сравнению с газом, дрова дают много дымовых выбросов, особенно при растопке.

Требования к качеству дров для отопления стандартизованы по ГОСТ 3243-88. Однако для бань требования более жёсткие. По крайней мере

в чёрных банях выбор дров всегда имел определяющее значение. Дрова должны были быть малосмолистыми – из древесины лиственных пород – ольхи, берёзы, осины, дуба, липы (чтобы поменьше дымили), тщательно высушенными (чтобы не дымили, не давали больших языков пламени и оставляли большое количество углей), достаточно крупными (чтобы равномерно прогревали, оставляли большое количество углей), и во всяком случае не хворост (сушёные ветки), не дровяные отходы по ГОСТ 23827-79 и не тонкомер (горбыль) ГОСТ 18288-87. Лучше всего подходит для чёрных бань предварительно заготовленный крупнокусковой древесный уголь (или породы древесины для пиролиза и углежжения по ГОСТ 24260-80).

В белых банях с закрытой каменкой требования к дровам несколько менее жёсткие. Так, влажные мелкоколотые дрова даже лучше прогревают фильтрующую каменку в дымовой трубе ввиду большого выхода летучих при газификации углей. После полного обугливания дров желательно бросить в печь мокрое осиновое полено или несущёные картофельные очистки, чтобы образовавшийся пар смог хотя бы частично газифицировать сажу с камней. Чем горячее камни, тем более опасной является сажа при поддачах (температура начала газификации угля водой начинается при 600–700°C). Некоторые дачники предпочитают наоборот, не газифицировать, а выжигать сажу с камней, для чего под конец

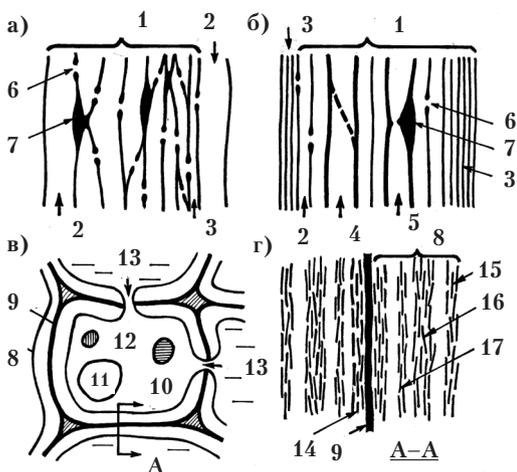


Рис. 77. Принципиальная схема клеточного строения древесины: а – вертикальный срез слоя годичного прироста древесины сосны с трахеидами (количество трахеид в годичном слое на рисунке сокращено), б – вертикальный срез слоя годичного прироста древесины берёзы с мелкими трахеидами и крупными трахеями (сосудами), в – горизонтальный срез растительной клетки (трахеиды), г – поперечный срез стенки клетки. 1 – годичный слой, прирастающий вправо, 2 – ранняя (весенняя) трахеида, 3 – поздняя (осенняя прошлого года) трахеида, 4 – сосуд с лестничной перфорацией, 5 – сосуд с простой перфорацией, 6 – окаймлённая пора, 7 – паренхима (сердцевидные лучи, смоляные ходы и т. п.), 8 – оболочка стенки клетки, 9 – срединная пластинка, общая для двух клеток, 10 – цитоплазма, 11 – вакуоли, 12 – ядро, 13 – сквозные отверстия, поры, перфорации, 14 – первичная оболочка, 15, 16 и 17 – трёхслойная вторичная оболочка с наиболее мощным средним слоем, состоящая из фибрил.

форации, 6 – окаймлённая пора, 7 – паренхима (сердцевидные лучи, смоляные ходы и т. п.), 8 – оболочка стенки клетки, 9 – срединная пластинка, общая для двух клеток, 10 – цитоплазма, 11 – вакуоли, 12 – ядро, 13 – сквозные отверстия, поры, перфорации, 14 – первичная оболочка, 15, 16 и 17 – трёхслойная вторичная оболочка с наиболее мощным средним слоем, состоящая из фибрил.

топки бросают сухую осину или высушенные картофельные очистки. В нефилтрующихся каменках требования к дровам минимальные.

### *5.6.1. Структура древесины*

Древесина представляет собой очень неоднородное по своему составу и пространственной структуре образование. Располагаясь между корой и сердцевинной древесиной, древесина прирастает, утолщая ствол, из так называемого камбия – особой образовательной ткани, очень тонкой, не видимой глазом, располагаемой между древесиной и лубом (корой). В камбии путём деления клеток рождаются новые живые сильно удлинённые вдоль ствола клетки (прозенхимные, то есть волокноподобные) длиной в среднем 3,5 мм и толщиной 0,05 мм у сосны и длиной 1,2 мм и толщиной 0,02 мм у берёзы. Эти клетки содержат (как и все клетки растений) внутри себя жидкую цитоплазму с ядрами, вакуолями, митохондриями, хлоропластами и т. д. (рис. 77). По мере нарастания новых внешних слоёв клеток, клетки во внутренних слоях постепенно умирают из-за образования в их стенках за счёт химического действия ферментов громадного количества пор (перфораций) и тем самым превращаются в так называемые трахеиды – элементы вертикальных сквозных каналов, способных проводить через себя питательные водные растворы по стволу из корней в крону дерева. В процессе эволюции у многих деревьев (в частности, у берёзы) возник новый тип проводящих элементов – трахеи (сосуды), образованные из множества члеников длиной (0,2–0,5) мм, подобных трахеидам, но перфорированных на концах для улучшения водопроведения. Соединяясь между собой, тысячи члеников образуют сквозную вытянутую вверх трубку с диаметром обычно много больше диаметра трахеид. Хвойные породы состоят только из трахеид, лиственные же породы деревьев состоят из очень многочисленных мелких трахеид и малочисленных, но крупных сосудов (трахей). Помимо прозенхимных (удлинённых и обычно мёртвых) клеток древесина содержит значительное (до 5% в хвойных и до 10% в лиственных породах) количество паренхимных (живых неудлинённых, обычных) клеток, обладающих свойствами синтеза, накопления и потребления (белков, смол, терпенов, эфирных масел) и образующих сердцевинные лучи, смоляные ходы и т. п.

Максимальная активность камбия наблюдается весной во время сокодвижения. Клетки при этом образуются крупные (иными словами, ранние трахеиды имеют большое поперечное сечение). После образования листьев деятельность камбия затухает, а к осени прекращается. Поэтому осенние (поздние) трахеиды мелкие, имеют на срез более тёмный вид и поэтому часто отчётливо видимы глазом как концентрические окруж-

ности – годовичные кольца (слои прироста). По количеству годовичных колец определяют возраст дерева. В тропических регионах, где зима и лето не отличаются по температуре, годовичные кольца на деревьях отсутствуют. Наличие годовичных колец, их извилистость, отличие на южной и северной сторонах ствола являются ценнейшим декоративным свойством древесины. На топливные же свойства годовичная структура не влияет, важен лишь диаметр трахеид и сосудов. Если трахеиды мелкие – древесина плотная, тяжёлая, легко колется (берёза, дуб, лиственница, бук, ясень, граб). Если трахеиды крупные – древесина рыхлая, лёгкая, вязкая при распиле и расколе (сосна, ель, осина, пихта, липа).

Высушенная древесина состоит преимущественно из стенок прозенхимных клеток трахеид и сосудов (составляющих по массе 93% у сосны и 65% у берёзы) и некоторой доли паренхимы в виде смол и пахучих веществ. Именно стенки клеток трахеид (как конструкционный скелет) представляют собой дрова как топливо. Напомним, что стенки прозенхимных клеток состоят из срединной пластинки и примыкающих к ней с обеих сторон первичных оболочек, состоящих из микрофибрилл (мицелл) – пучков из 30–40 полимерных молекул целлюлозы, каждая из которых состоит по длине из тысяч звеньев (колец) мономера. Микрофибрилла представляет собой набухающее в воде лентоподобное образование длиной несколько микрометров (тысячных долей миллиметра) и длиной несколько нанометров (миллионных долей миллиметра). Вторичная оболочка состоит из трёх слоёв, образованных фибриллами – пучками микрофибрилл. Фибриллы имеют поперечные размеры около 400 нанометров. Зазоры между фибриллами и между микрофибриллами очень маленькие (менее 1 нм), что и обуславливает гигроскопичность древесины (Лесная энциклопедия, М.: СЭ, 1985 г.).

По мере взросления клетки её стенки пропитываются лигнином, и наступает её одревеснение – повышение плотности, твёрдости, снижение пластичности. Лигнин – природный полимер с плотностью 1250–1450 кг/м<sup>3</sup>, аморфное вещество жёлто-коричневого цвета, образующееся в результате полимеризации различных ароматических спиртов, нерастворимое в воде и органических растворителях, но переводимое в растворимое состояние в растворах гидросульфита (технология получения целлюлозы сульфитным методом). Лигнин осаждается между микрофибриллами целлюлозы и схватывает их в каркас. Аналогичную роль играют гемицеллюлозные легкогидролизуемые полисахариды, также цементирующие клеточную стенку. Так что, если живой ветке (или стволу) дерева придать принудительно какую-либо фиксированную форму изгибом (например, круга или зигзага), то по мере роста этой ветки в деформированном состоянии, она одревенеет (то есть стенки клеток пропитаются лигнином и гемицеллюлозами) и со-

хранит эту заданную форму навсегда, что может быть положено в основу технологии деревообработки (изготовление фигурных изделий).

В реальной древесине всегда содержится вода – так называемая свободная внутри полостей клеток (трахеид, сосудов) и так называемая связанная в стенках клеток (в набухших микрофибриллах). Количество связанной воды составляет обычно 30% от массы абсолютно сухой древесины. При удалении влаги из стенок клеток (при влажности древесины менее 30%) стенки клеток начинают усыхать – сжиматься и деформируются. В результате древесина даёт усушку (усадку) с уменьшением линейных размеров в основном поперёк волокон (трахеид).

### *5.6.2. Физико-химические свойства древесины*

Элементный химический состав абсолютно сухой древесины всех пород практически одинаков: углерод 49–50%, кислород 42–44%, водород 6–7%, азот 0,1–0,7%, неорганическая часть 0,1–2% (зола, состоящая из окислов калия, кальция, натрия, магния, кремния и т. п.). В абсолютно сухой древесине содержится 39–58% целлюлозы, 17–34% лигнина, 15–38% гемицеллюлозы и до нескольких процентов восков, смол, таннинов, жиров, эфирных масел. Плотность древесного вещества (материала абсолютно сухих клеточных стенок) не зависит от породы и равна 1530 кг/м<sup>3</sup>. В то же время плотность абсолютно сухой древесины из-за наличия внутриклеточных пустот колеблется для разных пород в широких пределах от 100 кг/м<sup>3</sup> (бальса) до 1300 кг/м<sup>3</sup> (гваякум). Теплота сгорания абсолютно сухой древесины всех пород одинакова и составляет 4500 ккал/кг=18800 кДж/кг=5,2 кВт·час/кг. Это значение соответствует присутствию воды в продуктах сгорания в виде водяных паров. Именно это значение используется во всех энергетических расчётах печей, поскольку водяные пары в топливнике и дымоходах никогда не конденсируются. Если же водяные пары в дымовых газах всё же сконденсировать, то теплота сгорания повысится до 4700–4900 ккал/кг, то есть на 4–8%. Этот процесс реализуется в ультрасовременных, так называемых «конденсирующих» теплогенераторах (см. далее рис. 102в), полностью охлаждающих дымовые газы с конденсацией водяных паров и полезно использующих дополнительно снимаемое тепло. Тяга теплогенератора при этом уже не может создаваться дымовой трубой и обеспечивается электрическим вытяжным вентилятором. Коэффициент полезного действия конденсирующих теплогенераторов может достигать 106–108% (считая за 100% идеальный теплогенератор без конденсации пара и без охлаждения дымовых газов).

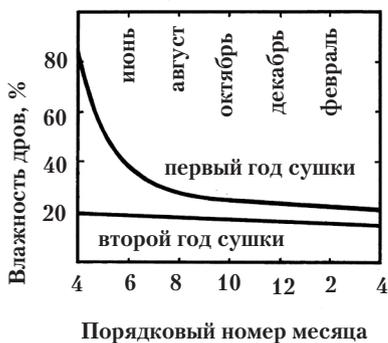


Рис. 78. Динамика реальной сушки берёзовых дров, распиленных, расколотых (10×10 см), сложенных в поленицу под навес в апреле.

Всё это относится к абсолютно сухой древесине. В реальности древесина всегда влажная, и даже абсолютно высушенная древесина увлажняется в реальном воздухе. В промышленности влажность древесины может определяться по-разному. В этой книге (см. рис. 55) относительная влажность дре-

весины  $w$  определена как процентное отношение массы воды в древесине (влаги) к массе абсолютно сухой древесины. Такое определение принято в деревообрабатывающей индустрии. Но можно ввести понятие относительной влажности древесины  $W$  и как процентного отношения массы воды в древесине (влаги) к массе реальной влажной древесины. Это определение используется при категорировании древесины как топлива в энергетике, причём древесину в методике измерения сушат при температуре  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  до постоянного веса (до абсолютно сухого состояния). Пересчёт влажностей ведут по таблице:

$W, \%$	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	75	80	100
$w, \%$	0	5,3	11,1	17,7	25	33,3	42,9	66,7	100	150	300	400	$\infty$

При малых значениях  $W$  и  $w$  близки между собой. Как и ранее, в дальнейшем будем использовать понятие влажности  $w$  (понимая под этим относительную влажность  $w$ ).

Для характеристики степени влажности древесины применяют следующие условные термины:

– мокрая древесина с влажностью более 100%, а при непосредственном контакте с водой до 260% (топляк),

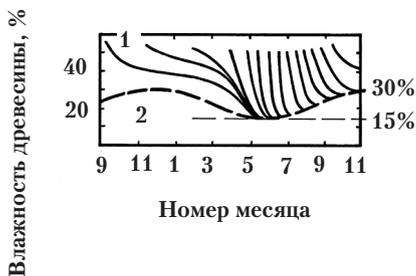


Рис. 79. Динамика атмосферной сушки хвойных пиломатериалов мягких пород толщиной 25 мм в штабеле с навесом в районе г. Санкт-Петербурга в течение года. 1 – кривые снижения влажности досок, заложенные в разные месяцы года, 2 – равновесная влажность древесины в текущий период (средняя за месяц). При увеличении толщины досок в 2 раза время сушки возрастает примерно тоже в 2 раза.

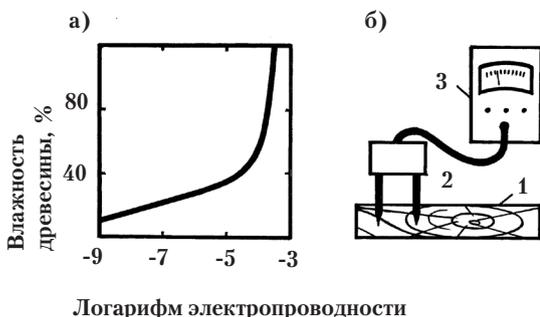


Рис. 80. Зависимость электропроводности древесины (в логарифмической шкале) от влажности древесины (а) и прибор для измерения влажности древесины (б): 1 – деревянное изделие, 2 – иглы, установленные на фиксированном расстоянии друг от друга, 3 – измерительный прибор (мегометр).

– сырая древесина с влажностью более 30%, в том числе свежесрубленная (влажная) с влажностью 50–100%,

– воздушно-сухая (атмосферно-сухая, товарная) древесина с влажностью 15–30%, в том числе высушенная на атмосферном воздухе под навесом в течение года и не увлажнённая осадками 15–20%; значение влажности 22% считается пределом биостойкости,

– комнатно-сухая (строительно-сухая) древесина с влажностью 8–15%, длительно находящаяся в отапливаемом помещении, в том числе в виде изделий и мебели,

– древесина мебельно-сухая (камерной сушки) с влажностью менее 4–8%, специально сушёная в сушильных камерах при температуре 70–100°C, в том числе в банях,

– абсолютно-сухая древесина с влажностью менее 4%, практически полностью лишённая влаги в результате длительной сушки в сухом воздухе при температуре выше 100°C.

Ввиду гигроскопичности даже абсолютно-сухая древесина (особенно в измельчённом состоянии) увлажняется в реальном воздухе до вполне определённой влажности, называемой гигроскопически-равновесной (см. рис. 55). В зависимости от строения древесина высушивается неравномерно: сначала относительно быстро испаряется свободная влага (летом за 1–3 месяца) с получением воздушно-сухой древесины, которая и используется в качестве дров. Затем уже более медленно испаряется связанная влага (рис. 78).

Более наглядно процесс сушки дров иллюстрируется примером сушки сосновых досок толщиной 25 мм в штабеле (рис. 79). Видно, что летом просушка древесины сосны уже фактически завершается через месяц после закладки, а зимой сушка идёт медленно.

Для оперативного измерения относительной влажности древесины используется метод электропроводности древесины. Абсолютно сухая древесина является диэлектриком. Но с увеличением влажности древе-



Рис. 81. Динамика увлажнения сосновых досок сечением 30×110 мм с влагостойкими торцами в горячей воде 96°C (1), в среде насыщенного пара над кипящей водой при атмосферном давлении (2) и в холодной воде (3). Под влажностью древесины здесь понимается отношение массы воды во всей доске в целом к массе доски в абсолютно сухом состоянии, то есть усреднённая величина локальных относительных влажностей всех зон доски (внутренних и внешних).

отношение массы воды во всей доске в целом к массе доски в абсолютно сухом состоянии, то есть усреднённая величина локальных относительных влажностей всех зон доски (внутренних и внешних).

сины её электропроводность быстро растёт (рис. 80). По достижении предела гигроскопичности (30%-ной влажности) темп роста электропроводности замедляется, а при влажности выше 80–100% электропроводность уже практически не изменяется. Электропроводность древесины в радиальном и тангенциальном (относительно сердцевины ствола) направлениях примерно одинакова, а вдоль волокон примерно в 2 раза больше (так же теплопроводность и паропроницаемость). На этих явлениях сконструированы промышленные влагомеры для пиломатериалов, например, электровлагомер ЭВ-2К с двумя диапазонами измерения влажности 7–22% и 22–60%, а также переносный влагомер ИВ-1. Этот же метод может быть использован для контроля увлажнения деревянных потолков любительских бань при поддачах. Например, можно воткнуть две иглы на глубину 3–5 мм (в промышленной методике на глубину 0,2 от толщины доски) так, чтобы электрический ток шёл вдоль волокон, а расстояние между игл было минимальным 5–10 мм. Затем взять любой покупной мегометр со шкалой с пределом более 1000 Ком (или бытовой тестер-мультиметр, любой из массы продающихся сейчас в розничной торговле) и присоединить разъёмы прибора к иглам. В качестве игл удобно использовать винчиваемые в потолок саморезы, шурупы, анкеры или даже болты с гайками (заранее устанавливаемые в вагонке потолка). Такой самодельный влагомер можно при желании откалибровать по образцам древесины разной влажности. Для специалистов отметим, что этот «прибор» является фактически также и гигрометром (при соответствующем пересчёте или калибровке). Этот «прибор» можно использовать и для контроля влажности деревянных несущих конструкций (например, балок пола) в труднодоступных местах строения бани, и для контроля момента появления пота на коже человека, и для оценки содержания солей в пресной воде, поте и т. п.

При попадании на сухие дрова воды (дождя), влажность дров возрастает (рис. 81), но по другим количественным закономерностям, нежели

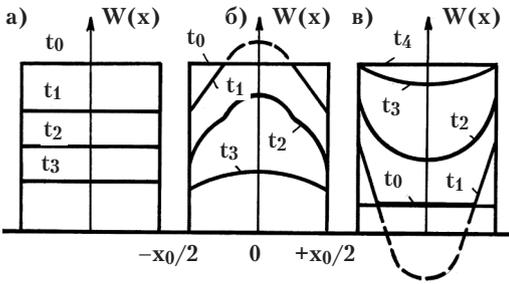


Рис. 82. Временной ход распределения относительной влажности древесины  $w$  в толщине доски толщиной  $x_0$ : а – при высушивании с очень малой скоростью, б – при высушивании с большой скоростью (в среде горячего сухого воздуха), в – при увлажнении водой или водяным паром,  $t_0$  – начальный момент времени,  $t_1, t_2, t_3, t_4$  – последовательные моменты времени.

уменьшение влажности по сушке. Это объясняется тем, что сушка сопровождается перемещением в капиллярах паров воды, а при увлажнении вода перемещается по капиллярам в виде жидкости. Относительно медленное увлажнение древесины на рисунке 81 объясняется не столько плохой смачиваемостью поверхности древесины водой (что также имеет место), сколько низкой скоростью просачивания воды в капиллярах. При этом в первые часы контакта сухой древесины с водой происходит сильное увлажнение (до 50–100%) внешних зон древесины, хотя центральные (внутренние) зоны древесины ещё долго остаются сухими.

Неоднородное распределение относительной влажности древесины в объёме доски или полена является обычным явлением. Так, даже свежесрубленная древесина хвойных пород имеет в центральной сердцевинной части ствола влажность 35–40%, а в периферийных зонах 100–140% (при средней влажности по стволу в целом 90%). Неоднородность влажности внутри древесины может возникнуть и при сушке влажной (и увлажнении сухой) древесины. Действительно, дифференциальное уравнение нестационарного перераспределения влаги имеет вид  $dw/dt = Dd^2w/dx^2$ , абсолютно аналогичный дифференциальному уравнению нестационарной теплопроводности (см. раздел 5.5). Точно так же как и на рисунке 76, распределения функции (теперь уже относительной влажности древесины  $w$ , а не температуры  $T$ ) изменяются по времени по разному в зависимости от скорости сушки или увлажнения (в зависимости от параметра, аналогичного Био).



Рис. 83. Зависимость усреднённого коэффициента древесины бука поперёк волокон от относительной влажности древесины при температуре 50°C.

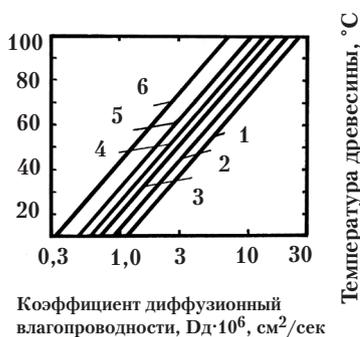


Рис. 84. Зависимость усреднённого коэффициента диффузионной влагонепроводности древесины поперёк волокон от температуры древесины при относительной влажности древесины ниже 30% (в условиях гигроскопичности): 1 — сосна, 2 — ель, 3 — берёза, 4 — бук, 5 — лиственница, 6 — дуб.

При низкой скорости сушки (например, при сушке в холодном воздухе) влажность внутри древесины успевает выравняться, то есть выпуклость  $w(x)$  в моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  крайне низкая (рис. 82а). При большой скорости сушки кривая распределения влажности имеет вид косинусоиды, в начальные моменты  $t_1$  «урезанной» (рис. 82б). В последующие моменты косинусоида может иметь изломы, показывающие, что коэффициент влагонепроводности  $D$  при влажностях выше 30%, может быть ниже, чем в условиях гигроскопичности (при влажности ниже 30%). Это указывает на то, что распространение гигроскопической влаги происходит легче, чем распространение воды в крупных порах (вопреки бытующему мнению). Однако распространение остаточных количеств гигроскопической влаги происходит неминуемо при низких градиентах влажности внутри древесины, а значит медленно.

Экспериментальная зависимость коэффициента влагонепроводности  $D$  от влажности древесины действительно имеет немонотонный характер (рис. 83). Влагонепроводность вдоль волокон в 10–20 раз больше, чем поперёк волокон. При этом в радиальном направлении влагонепроводность в 1,1–1,7 раз больше, чем в тангенциальном (вдоль окружности годовичных колец). На рисунках 83 и 84 приведены усреднённые значения по радиусу и по окружности.

При высоких влажностях древесины (выше 100%) влагонепроводность очень высока, этот режим отвечает течению свободной воды в крупных порах (см. первый механизм в разделе 4.2.5). В литературе этот режим называется по-разному (водопроводным, осмотическим, молярным и т. п.), что обусловлено недостаточной изученностью процесса. Также сложным для анализа является второй механизм (при влажностях древесины 30–100%), называемый условно капиллярным, но имеющим, видимо, в своей основе явление растекания воды по поверхности пор. При влажностях древесины ниже 30% (то есть в условиях гигроскопичности) крупные поры свободны от воды и заполнены воздухом, вследствие чего механизм переноса влаги является однозначно диффузионным. На рисунке 84 представлена экспериментальная зависимость диффузи-

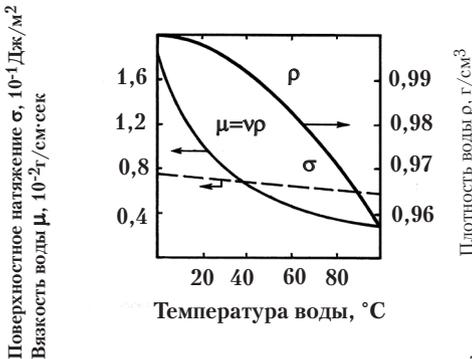


Рис. 85. Температурные зависимости свойств дистиллированной воды в компактном (жидком) состоянии.

тот же массовый поток пара в других терминах равен  $q_{п} = D_{д} d(\rho w) / dx = D_{д} \rho \times (dw_{гигр} / dp_{п}) (dp_{п} / dx)$ , поскольку массовое содержание влаги в единице объёма древесины равно  $\rho w$  (где  $\rho$  и  $w$  – плотность и относительная влажность древесины соответственно), относительная влажность древесины как правило равна гигроскопически равновесному значению при равновесном давлении пара  $p_{п}$  внутри древесины при температуре  $T_{д}$ . Отсюда следует, что диффузионная составляющая  $D_{д}$  коэффициента влагопроводности  $D$  равна  $D_{д} = \mu_{п} / \rho \times (dw_{гигр} / dp_{п})$ . Поскольку с ростом температуры  $(dw_{гигр} / dp_{п})$  быстро уменьшается (см. наклон кривых на рис 55), то  $D_{д}$ , соответственно, с ростом температуры быстро растёт (рис. 84).

В теории сушки древесины коэффициент влагопроводности представляют в виде суммы диффузионной, капиллярной и осмотической составляющих. При увлажнении древесины (рис. 82в) определяющую роль играет осмотическая составляющая влагопроводности, часто называемая водопроводностью, описывающая течение воды в капилляре со скоростью  $v = \pi r^4 \Delta p / 8 \mu l$  (где  $r$  и  $l$  – радиус и длина капилляра,  $\Delta p$  – перепад гидродинамического давления,  $\mu$  – динамическая вязкость воды, см. подробнее ниже в разделе 5.7), в частности, под действием капиллярного перепада давления  $\Delta p = 2\sigma / r$ , где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения воды. Поскольку вязкость воды с ростом температуры уменьшается (рис. 85), то коэффициент осмотической влагопроводности и скорость увлажнения с ростом температуры растут (рис. 81). Приведённые данные помогут дачнику оценить не только дина-

онной влагопроводности  $D_{д}$ , которая должна быть расчётным образом связана с коэффициентом паропроницаемости древесины (см. таблицу 4). Чем выше температура древесины, тем больше коэффициент диффузионной влагопроводности, тем быстрее удаляется влага из древесины.

Действительно, массовый поток пара через древесину определялся нами ранее как  $q_{п} = \mu_{п} (dp_{п} / dx)$  (см. раздел 3), где  $\mu_{п}$  – паропроницаемость древесины по таблице 4. С другой стороны

мику сушки дров, но и динамику сушки и увлажнения потолка паровой бани при поддачах.

Многие методики в древесиноведении стандартизованы в большой группе стандартов, в том числе определения плотности ГОСТ 16483.1-84, водопоглощения ГОСТ 16483.20-72, влагопоглощения ГОСТ 16483.19-72, водопроницаемости ГОСТ 16483.15-72, газопроницаемости ГОСТ 16483.34-77, гигроскопичности ГОСТ 16483.32-77 и т. д. Напомним попутно, что аналогичные процессы распространения влаги в пористых материалах рассматриваются в теории керамики, в теории грунтов и т. п. Причём и там пористые материалы при сушке усыхают, сжимаются («салятся»).

При высоких скоростях сушки периферийные зоны высушиваются намного быстрее внутренних, особенно в начальные периоды интенсивной сушки в условиях высокой влажности древесины внутри (см. кривую  $t_1$  на рисунке 82б). Внешнее кольцо сохнувшей древесины усыхает, то есть сжимается, стягивая влажную сердцевину бревна (доски, полена). При этом во внешних слоях возникают большие упругие напряжения, стремящиеся «разорвать» сжимающуюся внешнюю «корку» сохнувшей древесины (рис. 86). В результате интенсивной сушки дрова и пиломатериалы обычно сильно растрескиваются (рассыхаются) и коробятся.