



Китайцы уважают пот от тяжелого труда в жарком поле, а финны – от крепкого пара в жаркой бане, Финны нагревают камни так, чтобы от них шёл пар, а китайцы так, чтобы из них выплавлялась медь.

4. Климатические характеристики бани

«Одеждой» раздетого человека в бане является воздух. Как мы уже отмечали, неподвижный воздух имеет наивысшие (из всех «натуральных» материалов) теплоизолирующие свойства. Однако даже малейшие движения воздуха и/или лучистые теплотокки, и/или процессы испарения и конденсации полностью «уничтожают» теплоизоляцию раздетого человека, как бы ещё раз «раздевают» его. Поэтому, чтобы раздетому человеку в бане было тепло, обстановка в бане должна иметь вполне определённые климатические (метеорологические) параметры.

Под метеорологическими (погодными) параметрами будем понимать текущее состояние атмосферы в бане в данный момент (температура, влажность, скорость перемещения воздуха), а также интенсивность теплового излучения от печи и ограждений. Совокупность возможных метеопараметров и особенности их изменения во времени (динамику) в данной конструкции бани назовём климатическими параметрами.

Но есть такие бани, где нагрев (или охлаждение) человека осуществляется не только воздухом и тепловым излучением, но и прикосновением твёрдых тел (камней, металлов, восков), воды, масел и т. п. Например, человек в турецкой бане прогревается на тёплой плите или прогревается погружением ног в ванночку с горячей водой. Такие бани будем называть внеклиматическими (см. раздел 9), поскольку роль метеорологических параметров может быть существенно снижена.

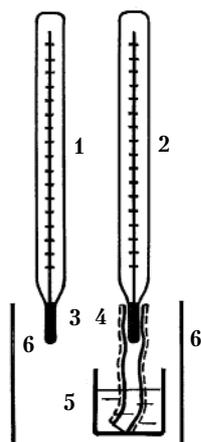
Для определённости и удобства будем условно считать, что метеорологические параметры и внеклиматические условия в бане должны обеспечить температуру мокрой кожи 40°C . Это гарантирует неуклонное повышение температуры тела, и человеку в бане не холодно. Конечно, можно было бы принять температуру кожи человека в бане равной 37°C , что соответствует начальным моментам пребывания в бане, но это никак не изменяет общей картины явлений.

4.1. Понятие влажного термометра

Оценить климатическую обстановку нам поможет простейший прибор – обычный стеклянный капиллярный термометр. Поместим термометр в баню с температурой 40°C . Показание термометра составит, естественно, 40°C . Примем, что этот термометр имитирует тело человека.

Теперь смочим резервуар термометра водой с температурой 40°C . Казалось бы, ничего не должно случиться. Но к нашему удивлению показания термометра начнут снижаться. Значит и мокрое тело человека должно охлаждаться. Действительно, если вы разденетесь в нагретой жилой комнате, то холода вы не почувствуете. Но стоит только смочить кожу водой (даже тёплой), вы наверняка тотчас отчётливо почувствуете охлаждение смоченного участка тела. Этот факт является определяющим для правильного понимания климатических особенностей бань – в банях должно быть тепло не только с сухой, но и с мокрой кожей.

Таким образом, смачивая резервуар капиллярного термометра водой и снимая его показания, мы можем получить сведения о характере ощущений при смачивании кожи человека водой. Показания же сухого термометра характеризуют ощущения сухого человека.



Термометр со смоченным резервуаром уже давно с успехом используется в метеорологии и называется влажным (смоченным) термометром. Он конструктивно представляет собой обычный термометр, резервуар которого обмотан ватным тампоном (хлопчатобумажным фитилём), смоченным водой (рис. 18). Влажный термометр показывает, к какой температуре будет стремиться мокрое (влажное, смоченное, вспотевшее) тело человека в бане. Сухой термометр показывает истинную температуру воздуха в бане.

Рис. 18. Принцип устройства психрометра. 1 – капиллярный термометр (сухой), 2 – капиллярный термометр (влажный), 3 – резервуар термометра, 4 – фитиль из батиста, 5 – сосуд с водой, 6 – экраны для защиты от лучистого нагрева.

На рисунке 19 приведена широко известная в метеорологии так называемая психрометрическая кривая, рассчитанная для температуры воздуха 40°C по сухому термометру. Видно, что чем ниже относительная влажность воздуха (измеряемая гигрометром), тем ниже показания влажного термометра, тем более прохладно чувствует себя человек при одной и той же температуре воздуха.

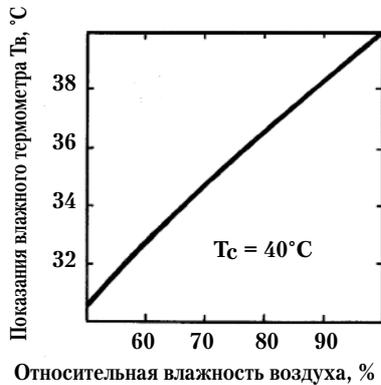


Рис. 19. Зависимость показаний влажного (смоченного) термометра от относительной влажности воздуха (психрометрическая кривая) при температуре $T_c = 40^\circ\text{C}$.

Причина этого давно известна. Если на поверхности любого (живого или неживого) тела имеется вода (влага), то она, испаряясь, приводит к охлаждению предмета. Это охлаждение вызвано тем, что испарение воды требует больших затрат тепла 539 кал/г (2250 кДж/кг), называемых скрытой теплотой испарения. Но если испарение воды с поверхности предмета невозможно (например, если воды на предмете вообще нет или эта вода находится под слоем жира (масла, сала) или если относительная влажность изотермического с предметом воздуха равна 100% , и воздух просто физически не может больше принять в себя воду), то и охлаждение предмета не происходит.

То есть человек своими органами чувств (кожными терморепцепторами) способен правильно оценить температуру воздуха лишь тогда, когда его кожа сухая и/или засалена и/или когда воздух не способен принять испаряющийся пот (влагу), и в силу этого испарение невозможно. Так и термометр показывает истинную температуру воздуха лишь в двух случаях: либо если он сухой, либо если воздух до предела насыщен водой и имеет поэтому относительную влажность 100% (рис. 19).

О чём говорит любителю бани психрометрическая кривая? Предположим, вы входите сухим в турецкую баню, нагретую до температуры 40°C . При этом под турецкой баней будем понимать замкнутый сосуд (каменный, деревянный, металлический, пластиковый), дно, стенки и крышка которого всюду нагреты до одной и той же температуры, в данном случае до 40°C . Воздух, естественно, тоже нагрет до 40°C . Поскольку у вас кожа сухая, вы начинаете нагреваться до 40°C (как и сухой термометр). Становится жарко. Протираете себя мокрой, нагретой до 40°C тряпкой и неожиданно отчётливо чувствуете, что баня, только что бывшая тёплой, становится неимоверно холодной. Смотрите на гигрометр — он показывает относительную влажность 50% . Ну что ж, ясно, ведь согласно психрометрической кривой ваше мокрое (смоченное, влажное) тело стремится к температуре 30°C . Значит надо повышать температуру, чтобы не заоченеть. Но есть и другой путь. Плеснём воду на пол турецкой бани. Вода начинает испаряться, влажность воздуха повышается и при достижении относительной влажности воздуха 94% ваше влажное тело нагревается до 39°C , а при достижении относительной влажности

воздуха 100% – до 40°C. Вновь становится жарко, хотя температура по показаниям сухого термометра как была равна 40°C, так и осталась.

Так что же, достаточна ли температура 40°C для бани? Почему то жарко, то холодно? Ответ ясен – говорить о температуре бани без указания влажности воздуха бессмысленно точно так же, как в обычной метеорологии. Если вы приземляетесь в Гаване, и вам говорят, что температура воздуха за бортом 40°C при влажности 90%, то значит вам придётся выходить в душное пекло. Но если вы приземляетесь в Ашхабаде, и вам говорят, что за бортом 40°C при влажности 10%, то вы можете даже не снимать пиджак, а на ветерке в тени даже почувствовать «прохладу». Важным фактором является состояние кожи – с сухой кожей вам в сухом горячем воздухе может стать жарко, а вот с мокрой кожей может стать даже холодно. Отметим, что в дальнейшем, говоря о мокрой коже, мы будем иметь в виду специально (искусственно) намоченную водой кожу. Так что для правильных заключений о банной метеобстановке человек должен быть обязательно в неразгорячённом состоянии и должен сопоставить свои ощущения как при сухой, так и при специально намоченной водой (а не просто потной) коже. Это объясняется тем, что пот обычно хуже испаряется (чем обычная вода на коже), поскольку при малых содержаниях пот находится в порах кожи, а при больших содержаниях (в виде капель на коже) пот может быть покрыт маслянистой плёнкой, и, кроме того, содержать много солей, повышающих температуру кипения

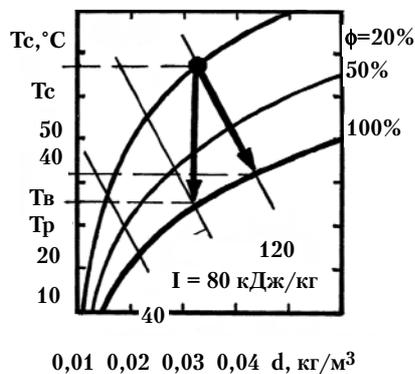


Рис. 20. термодинамическая $I - d$ – диаграмма влажного воздуха, рассчитанная для нормального барометрического давления $p=1$ атм. По вертикальной оси температура воздуха T_c (в градусах Цельсия по сухому термометру). По горизонтальной оси – абсолютная влажность воздуха d (количество водяных паров в килограммах на один кубический метр воздуха). Кривые – зависимости d от T_c для разных значений относительной влажности воздуха ϕ в процентах. Прямые – линии постоянства энтальпии (теплосодержания) влажного воздуха $I = \text{const}$ для значений 40, 80 и 120 кДж/кг. Порядок определения показания

влажного термометра T_w : из точки с определёнными T_c и d проводим наклонную стрелу вдоль линии $I = \text{const}$ до пересечения с кривой, соответствующей $\phi = 100\%$; считываем показание T_w , соответствующее точке пересечения. Порядок определения точки росы T_r : из точки с определёнными T_c и d проводим вертикальную стрелу вдоль линии $d = \text{const}$ до пересечения с кривой, соответствующей $\phi = 100\%$; считываем показание T_r , соответствующее точке пересечения.

воды. К тому же потный человек неминуемо находится в разгорячённом состоянии, при котором субъективные оценки тепла и холода условны.

В метеорологии понятие влажного термометра считается основополагающим. Совокупность показаний сухого и влажного термометров, составляющих психрометр (рис. 18), однозначно определяет относительную влажность. Относительная влажность может быть измерена независимо прибором гигрометром, а затем по показаниям сухого термометра и гигрометра может быть рассчитано значение показания влажного термометра. Для специалистов напомним для справки универсальную диаграмму влажного воздуха (рис. 20), детальный вид которой можно найти в любой книге по климатологии. Из этой диаграммы, зная любые два значения из шести показателей (температура сухого термометра T_c , температура влажного термометра T_b , температура точки росы T_p , относительная влажность ϕ , абсолютная влажность d , энтальпия воздуха I), можно определить и остальные.

Совершенно ясно, что не только относительная влажность воздуха влияет на показания влажного термометра. Например, если обдувать сухим воздухом влажный термометр, то скорость испарения увеличится, и показания термометра ещё более снизятся. Поэтому в климатологии

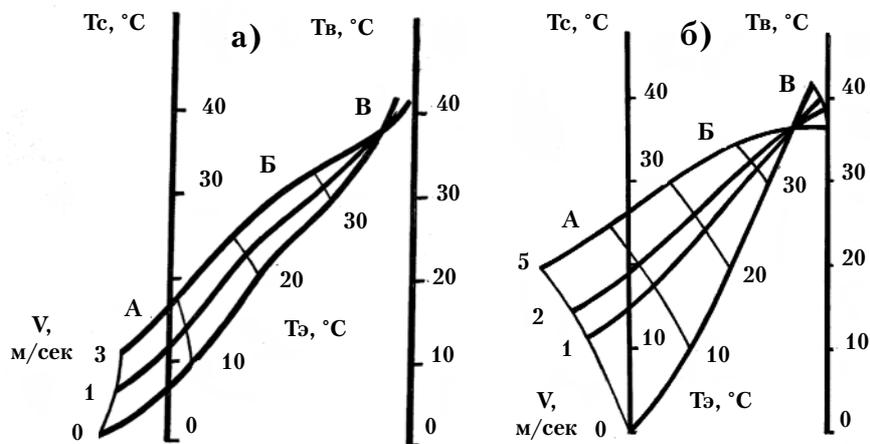
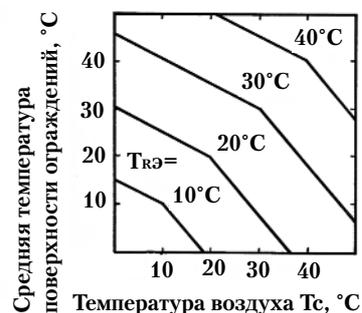


Рис. 21. Диаграммы для определения эквивалентно-эффективной (кажущейся) температуры воздуха $T_{\text{э}}$ по показаниям сухого T_c и влажного T_b термометров при различных скоростях движения воздуха V : а – для одетого человека, б – для раздетого человека. Для определения $T_{\text{э}}$ находим на осях значения показаний сухого и влажного термометров, соединяем их прямой, на пересечении прямой с кривой, соответствующей действующему значению скорости ветра, считываем значение $T_{\text{э}}$. Зона комфорта $T_{\text{э}} = 17\text{--}22^\circ\text{C}$. А – внедомовая зона, Б – бытовая зона, В – банная зона.

(являющейся теоретической базой физиотерапии в медицине и кондиционирования воздуха в строительстве) учитываются факторы движения воздуха. На рис. 21 приведены зависимости кажущейся («эквивалентно-эффективной») температуры воздуха от влажности и скорости движения воздуха (А.В. Яковенко, Вопросы курортологии, № 4, 1969 г., стр. 356–363). Отметим, что эти зависимости объясняют инверсию ощущений человека при низких температурах в зоне А, когда сухой воздух ощущается как более «тёплый». Нас же интересует высокотемпературная зона В, отвечающая банным условиям, и также имеющая инверсию, о которой и пойдёт речь в следующих разделах.

Также ясно, что если термометр находится в зоне лучистых потоков, то его показания увеличиваются. Всем известно, что показания термометра «на солнце» выше, чем в «тени». В быту поэтому говорят, что температура воздуха «на солнце» больше, чем в «тени». Это, конечно, не правильно. Температура воздуха «на солнце» не может заметно отличаться от температуры воздуха в «тени» вследствие наличия движения воздушных масс (под действием конвекции, ветра). За счёт лучистых потоков нагревается не воздух, а корпус термометра, в том числе и резервуар расширяющейся жидкости. Так что, как и прежде, термометр измеряет не температуру воздуха, а температуру самого себя. При этом, чем «черней» корпус термометра, тем выше его показания, поскольку чёрные предметы сильнее поглощают тепловое излучение (то есть меньше отражают), а потому и сильнее нагреваются. Тепловое излучение исходит от окружающих нагретых поверхностей, интенсивность этого излучения быстро увеличивается с ростом температуры излучающих поверхностей (см. раздел 4.6). На рис. 22 приведена характерная качественная зависимость показаний сухого термометра (так называемой «радиационно-эффективной» температуры), используемая во многих книгах по климатологии (см., например, В.И. Полушкин и др., Отопление, вентиляция и кондиционирование, СПб.: Профессия, 2001 г.). Таким образом, банные климатические условия в принципе могут быть получены при низких



температурах воздуха, но высоких температурах стен. Однако и в этом случае ощущения человека с мокрой кожей характеризуются показаниями влажного термометра, которые формируются

Рис. 22. Значения радиационно-эффективной температуры $T_{рэ}$ при различных температурах неподвижного воздуха T_c и различных средних значениях температуры поверхности стен (потолка, пола).

сложным образом, то есть и нагревом термометра лучистым потоком, и охлаждением его за счёт испарения воды с поверхности резервуара, в том числе и с учётом движения воздуха.

Отметим, что в популярной литературе встречаются ошибочные мнения, что увлажнение воздуха в банях приводит к существенному повышению теплоёмкости и теплопроводности воздуха, и именно поэтому тепловой поток на тело человека при поддачах в бане возрастает. На самом деле теплоёмкости и теплопроводности воздуха и водяных паров (как газов без учёта явлений конденсации пара) близки:

Численные значения для 100°С и 1 атм	Воздух сухой	Водяной пар
Коэффициент теплопроводности, Вт/м сек	0,032	0,024
Удельная теплоёмкость, кДж/м ³ град	1,3	1,5
Вязкость кинематическая, м ² /сек	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Вязкость динамическая, кг/м сек	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Плотность, кг/м ³	0,95	0,58

Ясно, что при удельном массовом содержании водяных паров в воздухе на уровне 5% (эта цифра отвечает хомотермальной влажности воздуха 0,05 кг/м³), свойства влажного воздуха будут практически неотличимы от свойств сухого. Так что, главным фактором в тепловом балансе человека в бане являются потери на испарение воды с кожи. В то же время неверны и «медицинские» заключения, что на испарение воды с кожи человек тратит так много тепла, что «теряет калории» и худеет, «сжигая» жировые запасы. В действительности же, мокрый человек, как и мокрый термометр, вовсе не «сжигает» жир и не тратит калорий. Это вода на коже испаряется и вследствие чего охлаждается, а охлаждённая вода охлаждает и кожу. Так что человек может терять вес лишь за счёт выделения пота, причём сам процесс выделения пота практически не требует затрат калорий. Действительно, сколько ни смачивай кожу водой, жировые запасы в организме не снизятся (разве что человеку станет холодно и он ознобом начнёт тратить калории на судорожные сокращения мышц).

4.2. Абсолютная и относительная влажность

В предыдущем разделе мы использовали ряд физических терминов. Ввиду их большой важности вспомним школьный курс физики и поясним, что же такое влажность воздуха, точка росы и как их измерить.

Первичным объективным физическим параметром является абсолютная (фактическая) влажность воздуха – массовая концентрация (содержание) газообразной воды (испарённой воды, водяных паров) в воздухе,



например, количество килограммов воды, испарённом в одном кубическом метре воздуха (точнее, в одном кубическом метре пространства). Если водяного пара в воздухе мало, то воздух сухой, если много – влажный. Но что значит много? Например, 0,1 кг водяного пара в одном кубическом метре воздуха – это много? И не много, и не мало, просто именно столько и ничего больше. Но если спросить, много ли – 0,1 кг водяного пара в одном кубическом метре воздуха при температуре 40°C, то можно определённо сказать, что очень много, так много, что никогда не бывает.

Дело в том, что сколь угодно много испарить воды не удаётся, поскольку в обычных банных условиях вода всё же является жидкостью, и лишь очень незначительная часть её молекул вылетает из жидкой фазы через поверхность раздела в газовую фазу. Поясним это на примере того же условного макета турецкой бани – модельного сосуда («кастрюли»), дно (пол), стенки и крышка (потолок) которого имеют одну и ту же температуру. В технике такой изотермический сосуд называется термостатом (духовкой).

Нальём на дно модельного сосуда (на пол бани) воду и, изменяя температуру, измерим абсолютную влажность воздуха при различных температурах. Окажется, что при подъёме температуры абсолютная влажность воздуха быстро повышается, а при снижении температуры – быстро снижается (рис. 23). Это является результатом того, что с ростом температуры быстро (экспоненциально) растёт число молекул воды с энергией, достаточной для преодоления энергетического барьера фазового перехода. Рост числа газифицирующихся («испаряющихся») молекул приводит к увеличению количества (накоплению) молекул воды в воздухе (к росту количества водяных паров), что приводит в свою очередь к увеличению числа молекул воды, вновь «влетающих» в воду (ожижающихся). Когда скорость газификации воды сравнивается со скоростью ожижения водяных паров, наступает равновесие, которое и описывается кривой на рис. 23. Важно при этом иметь в виду, что в состоянии равновесия, когда кажется, что в бане ничего не происходит, ничего не испаряется и ничего не конденсируется, на самом деле в действительности газифицируются (и тут же ожижаются) тонны воды (и водяного пара соответственно). Однако в дальнейшем мы будем считать испарением именно результирующий эффект – превышение скорости газификации над скоростью ожижения, когда количество воды реально уменьшается, а количество водяных паров реально увеличивается. Если же скорость ожижения превышает скорость газификации, то такой процесс будем называть конденсацией.

Значения равновесной абсолютной влажности воздуха называются плотностью насыщенного пара воды и являются максимально возможными

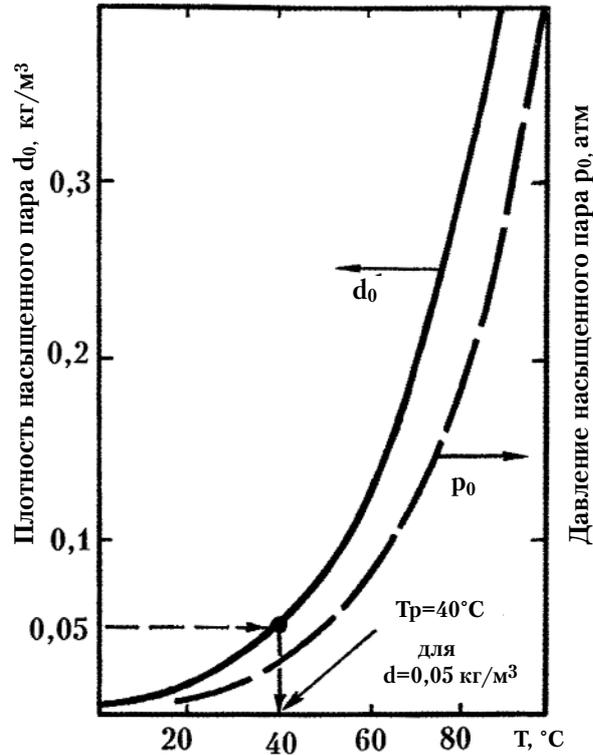


Рис. 23. Абсолютная влажность воздуха d_0 над водой в равновесных условиях (плотность насыщенного пара) и соответствующее давление насыщенного пара p_0 при различных температурах. Пунктирные стрелки – определение точки росы T_p для произвольного значения абсолютной влажности d .

абсолютными влажностями воздуха при заданной температуре. При повышении температуры вода начинает испаряться (превращаться в газ), стремясь к повышенному значению плотности насыщенного пара. При снижении температуры происходит конденсация водяных паров либо на охлаждающихся стенках в виде мелких капель росы (затем сливающихся в крупные капли и стекающих в виде ручейков), либо в объеме охлаждающегося воздуха в виде мелких капель тумана размером менее 1 мкм (в том числе и в форме «клубов пара»).

Так, при температуре 40°C равновесная абсолютная влажность воздуха над водой в изотермических условиях (плотность насыщенного пара) составляет $0,05 \text{ кг}/\text{м}^3$. И наоборот, для абсолютной влажности $0,05 \text{ кг}/\text{м}^3$

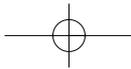


температура 40°C называется точкой росы, поскольку при этой абсолютной влажности и при этой температуре начинает появляться роса (при снижении температуры). С росой знакомы все по запотевшим стёклам и зеркалам в ванных комнатах. Абсолютная влажность воздуха однозначно определяет (по графику на рис. 23) точку росы воздуха и наоборот. Отметим, что точке росы 37°C , равной нормальной температуре тела человека, соответствует абсолютная влажность воздуха $0,04\text{ кг/м}^3$.

Теперь рассмотрим случай, когда условие термодинамического равновесия нарушено. Например, вначале модельный сосуд вместе с находящейся в нём водой и воздухом был нагрет до 40°C , а затем предположим чисто гипотетически, что температура стен, воды и воздуха вдруг резко поднялась до 70°C . Вначале имеем абсолютную влажность воздуха $0,05\text{ кг/м}^3$, соответствующую плотности насыщенного пара при 40°C . После подъёма температуры воздуха до 70°C абсолютная влажность воздуха должна постепенно подняться до нового значения плотности насыщенного пара $0,20\text{ кг/м}^3$ за счёт испарения добавочного количества воды. И на всём протяжении испарения абсолютная влажность воздуха будет ниже $0,20\text{ кг/м}^3$, но будет повышаться и стремиться к значению $0,20\text{ кг/м}^3$, которое рано или поздно установится при 70°C .

Подобные неравновесные режимы перехода воздуха из одного состояния в другое описываются с помощью понятия относительной влажности, значение которой является расчётным и равно отношению текущей абсолютной влажности к плотности насыщенного пара при текущей температуре воздуха. Таким образом, вначале мы имеем относительную влажность 100% при 40°C . Затем, при резком подъёме температуры воздуха до 70°C , относительная влажность воздуха резко скачком снизилась до 25% , после чего за счёт испарения вновь стала подниматься до 100% . Поскольку понятие плотности насыщенного пара бессмысленно без указания температуры, то и понятие относительной влажности тоже бессмысленно без указания температуры. Так, абсолютная влажность воздуха $0,05\text{ кг/м}^3$ соответствует относительной влажности воздуха 100% при температуре воздуха 40°C и 25% при температуре воздуха 70°C . Абсолютная же влажность воздуха является величиной чисто массовой и не требует привязки к какой-либо температуре.

Если относительная влажность воздуха равна нулю, то водяных паров в воздухе совсем нет (абсолютно сухой воздух). Если относительная влажность воздуха равна 100% , то воздух максимально влажен, абсолютная влажность воздуха равна плотности насыщенного пара. Если относительная влажность воздуха равна, например, 30% , то это означает, что в воздухе испарено лишь 30% того количества воды, которое в принципе можно испарить в воздухе при этой температуре, но пока не испарено



(или пока не может быть испарено по причине отсутствия жидкой воды). Иными словами, численное значение относительной влажности воздуха указывает, может ли ещё испаряться вода и сколько её может испариться, то есть относительная влажность воздуха фактически характеризует потенциальную влагоёмкость воздуха. Подчеркнём, что термин «относительная» соотносит массу воды в воздухе не к массе воздуха, а к максимально возможному массовому содержанию водяных паров в воздухе.

Но что будет, если в сосуде не будет единой температуры? Например, дно (пол) будет иметь температуру 70°C , а крышка (потолок) – всего 40°C . Тогда единое понятие плотности насыщенного пара и относительной влажности ввести не удаётся. У дна сосуда абсолютная влажность воздуха стремится подняться до $0,20 \text{ кг/м}^3$, а у потолка снизиться до $0,05 \text{ кг/м}^3$. При этом вода на дне будет испаряться, а на потолке будут конденсироваться водяные пары и стекать затем в виде конденсата вниз, в частности на дно сосуда. Такой неравновесный процесс (но, может быть, вполне устойчивый во времени, то есть стационарный) называется в промышленности перегонкой. Этот процесс характерен для реальных турецких бань, в которых постоянно конденсируется роса на холодном потолке. Поэтому в турецких банях в обязательном порядке делают сводчатые потолки с желобами (канавками) для стока конденсата.

Неравновесность может иметь место и во многих иных (а практически во всех реальных) случаях, в частности, при равенстве всех температур, но при нехватке воды. Так, если в процессе испарения вода на дне сосуда исчезает (испаряется), то далее испаряться будет нечему, и абсолютная влажность зафиксируется на одном уровне. Ясно, что достичь относительной влажности воздуха 100% в этом случае при повышенных температурах не удаётся, что является полезным фактором, в частности для получения сухой сауны или лёгкого пара в русской бане. Но если мы начнём снижать температуру, то при определённой пониженной температуре, называемой точкой росы, на стенках сосуда вновь появится вода в виде конденсата. В точке росы относительная влажность воздуха всегда равна 100% (по самому определению точки росы).

На принципе появления конденсата при снижении температуры воздуха создан широко известный в промышленности прибор для определения точки росы в газах. В стеклянной камере, через которую пропускают с низкой скоростью исследуемый газ, монтируют полированную металлическую поверхность, которую медленно охлаждают (рис. 24). В момент появления росы (запотевания) измеряют температуру поверхности. Эта температура и принимается за точку росы. Точное определение момента появления росы возможно только при помощи микроскопа, поскольку капли росы в первичный момент очень малы. Охлаждение по-

верхности производят отбором тепла жидким теплоносителем или любым иным способом. Температуру поверхности, на которую выпадает роса, измеряют любым термометром, предпочтительно термопарным. Принцип действия прибора становится ясным, если «дыхнуть» на холодное зеркало, особенно принесённое с холода в тёплое помещение – по мере нагрева зеркала запотевание неуклонно снижается, а потом прекращается вовсе.

Всё это означает, что при температурах выше точки росы поверхность всегда сухая, а если воду всё же специально налить, то она непременно испарится, поверхность высохнет. А при температуре ниже точки росы поверхность всегда мокрая, а если поверхность всё же искусственно высушить (вытереть), то вода на ней тотчас возникнет «сама собой» в том смысле, что высадится из воздуха в виде росы (конденсата).

Совершенно иная ситуация возникает в том случае, если поверхность является пористой (деревянной, керамической, цементно-песчаной, волокнистой и т. п.). Пористые материалы характерны тем, что имеют пустоты, причём пустоты имеют вид каналов с малым поперечным разме-

ром (диаметром) вплоть до 1 мкм и даже меньше. Жидкость в таких каналах (капиллярах, порах) ведёт себя иначе, чем на непористой поверхности или в каналах с большим поперечным размером. В случае, если поверхность каналов смачивается водой, то вода с поверхности впитывается вглубь материала и испарить её потом, как все знают, будет трудно. А если поверхность каналов водой не смачивается, а если её даже специально «впрыснуть» вглубь материала (например, шприцем),

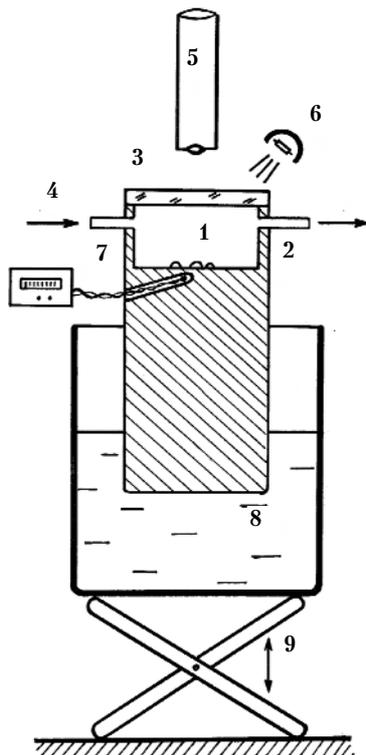
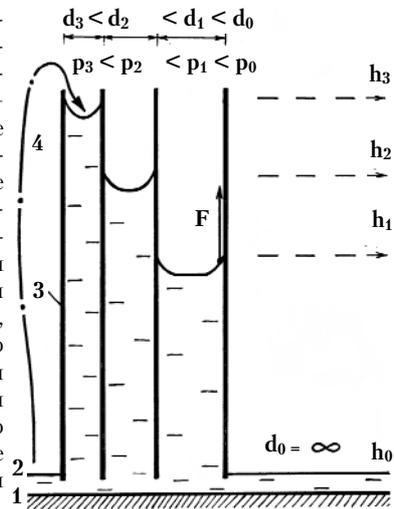


Рис. 24. Принцип устройства прибора для точного определения точки росы в газе. 1 – полированная металлическая поверхность для наблюдения факта появления капель росы, 2 – металлический корпус, 3 – стекло, 4 – вход и выход потока газа, 5 – микроскоп, 6 – лампа подсветки, 7 – термометр термопарный со спаем термопары, установленной в непосредственной близости к полированной поверхности, 8 – стакан с охлаждённой жидкостью (например, водоспиртовой смесью с твёрдой углекислотой – сухим льдом), 9 – подёмник стакана.

Рис. 25. Иллюстрация свойств пористого материала, представленного в виде совокупности каналов (капилляров, пор) разного поперечного размера d (диаметра). 1 – подложка непористая, 2 – вода, разлитая на подложке, 3 – капилляры пористого материала, всасывающие за счёт поверхностного натяжения F воду с подложки на тем большую высоту, чем тоньше капилляр (условный поперечный размер «канала» d_0 для воды вне капилляра равен бесконечности). Чем тоньше капилляр, тем меньше в нём равновесное значение давления паров воды (равновесная абсолютная влажность воздуха, плотность насыщенного пара), вследствие чего пары воды, образующиеся у поверхности воды на подложке, конденсируются на поверхности воды в капилляре (движение паров показано штрих-пунктирной стрелкой 4 – это явление увлажнения пористого материала парами воды из воздуха называется гигроскопичностью.



то она всё равно вытеснится (выпарится) наружу. Это происходит потому, что в смачивающихся капиллярах образуется вогнутый мениск поверхности жидкости, и силы поверхностного натяжения втягивают жидкость в капилляр (рис. 25). Чем тоньше капилляры, тем сильнее впитывается жидкость, причём высота подъёма столба жидкости в капилляре за счёт сил поверхностного натяжения может составлять десятки метров. Поэтому впитывающаяся жидкость постепенно распределяется по всему объёму пористого материала, что и используется деревьями для доставки питающих растворов из корней в листья кроны.

Пористые материалы имеют ещё одну важную особенность, обусловленную тем, что плотность насыщенного пара над вогнутой поверхностью воды меньше, чем над ровной плоской поверхностью воды, то есть меньше значений, указанных на рис. 23. Это вызвано тем, что молекулы воды из паровой фазы чаще влетают в компактную (жидкую) воду при вогнутом мениске (поскольку в большей степени «окружены» поверхностью компактной воды), и воздух обедняется водяным паром. Всё это приводит к тому, что вода с плоской поверхности испаряется и конденсируется внутри пористого материала в капиллярах со смачивающимися стенками. Такое свойство пористого материала увлажняться за счёт влажного воздуха называется гигроскопичностью. Ясно, что рано или поздно вся вода с непористых поверхностей «переконденсируется» в капилляры пористого материала. Это значит, что если непористые матери-

алы сухие, то это вовсе не означает, что и пористые материалы в этих условиях тоже сухие.

Таким образом, даже при низкой влажности воздуха (например, при относительной влажности 20%) пористые материалы могут быть увлажнены (даже при температуре 100°C). Так, древесина является пористой, поэтому при хранении на складе никак не может стать абсолютно сухой, сколько бы времени её не сушили, а может быть только «воздушно-сухой». Для получения абсолютно сухой древесины её необходимо нагреть до как можно более высоких температур (120–150°C и выше) при относительной влажности воздуха как можно более низкой (0,1% и ниже).

Воздушно-сухая влажность древесины определяется не абсолютной влажностью воздуха, а относительной влажностью воздуха при заданной температуре. Подобная зависимость характерна не только для древесины, но и для кирпича, штукатурки, волокон (асбест, шерсть и т. п.). Способность пористых материалов поглощать воду из воздуха называется способностью «дышать». Способность «дышать» эквивалентна гигроскопичности. Это явление будет рассмотрено более подробно в разделе 7.8.

Некоторые органические пористые материалы (волокона) способны удлиняться в зависимости от собственной влажности. Например, можно подвесить на обычной шерстяной нитке грузик и, увлажняя нить, убедиться, что нитка удлинилась, а потом по мере высушивания вновь будет укорачиваться. Это даёт возможность, измеряя длину нити, определить влажность нити. А так как влажность нити определяется относительной влажностью воздуха, то по длине нити можно определить и относительную влажность воздуха (правда, ориентировочно, с некоторой погрешностью, увеличивающейся с повышением влажности воздуха). На этом принципе работают бытовые гигрометры (приборы для определения относительной влажности воздуха), в том числе и банные (рис. 26).

При высыхании укорачиваются и волокна древесины. Этим объясняются эффекты изменения формы веток растений и коробление пиломатериалов при

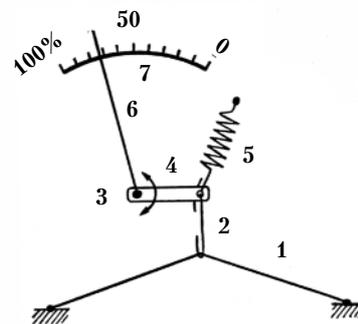
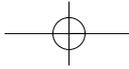


Рис. 26. Принцип устройства гигрометра. 1 – гигроскопическая нить, растягиваемая при увлажнении (из натурального или искусственного материала), неподвижно закреплённая с двух концов на корпусе прибора, 2 – проволочная тяга регулируемой длины для калибровки прибора, 3 – ось вращения показывающей стрелки прибора, 4 – рычаг стрелки, 5 – натяжная пружина, 6 – стрелка, 7 – шкала.



сушке. На гигроскопичности древесины основаны многочисленные конструкции самодельных деревенских гигрометров (рис. 27 и 28).

Таким образом, вогнутые поверхности воды в смачивающихся капиллярах определяют специфические свойства пористых материалов (в частности, гигроскопичность и изменение механических свойств). Не меньшую роль играют и выпуклые поверхности воды (на несмачивающихся плоских поверхностях подложек и в несмачивающихся капиллярах), над которыми давление насыщенных паров воды больше, чем над плоскими и вогнутыми поверхностями воды. Это означает, что несмачивающиеся материалы являются более «сухими», чем смачивающиеся: вода испаряется с несмачивающихся материалов и затем образовавшиеся пары конденсируются на смачивающихся. На этом основано действие водоотталкивающих пропиток древесины, не допускающих не только проникновения жидкой воды в поры, но и конденсацию паров воды внутри древесины. Выпуклостью капель воды в воздухе объясняется лёгкое испарение тумана, а также затруднительность (по сравнению с росой) его образования при переохлаждении влажных газов (в частности, в банях, в облаках, в тучах и т. п.).

В заключение отметим особенности бытовых понятий и профессиональных терминов, связанных с влажными газами. Очень многие любители бань до сих пор уверены, что каменки русских бань «выдают» при «взрывных» поддачах отнюдь не какие-то там пары воды, а газовзвесь (пыль) мелких частиц горячей воды, причём самые микроскопические частицы горячей воды и есть тот самый «лёгкий пар». Поэтому сторонникам этой красивой бытовой теории приходится мучительно метаться между явной целесообразностью «турецкой» поддачи на большие, но умеренно горячие поверхности пола (дающей по этой теории, вроде бы самый «лёгкий» пар) и «полезностью» русской поддачи на относительно малые

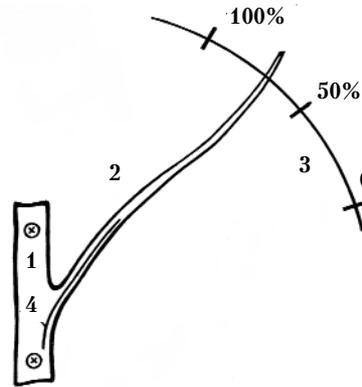
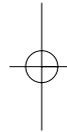


Рис. 27. Простейший самодельный гигрометр из высушенной и ошкуренной деревянной ветки. 1 – основной побег, обрезанный с двух сторон и прикреплённый к стене (расположенной в плоскости листа), 2 – вторичный боковой побег толщиной 3–6 мм и длиной 40–60 см, 3 – шкала, нанесённая на стене и построенная по градуированному аттестованному гигрометру (или по метеосводкам данной местности). При низкой относительной влажности древесины побега высыхает, продольное древесное волокно 4 укорачивается и оттягивает боковой побег от основного.



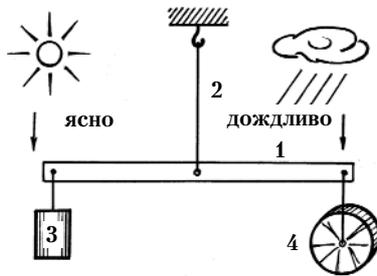
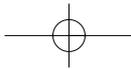


Рис. 28. Простейший самодельный гигрометр, основанный на увеличении массы увлажняющейся древесины при высоких относительных влажностях воздуха. 1 – коромысло (весы), 2 – нить подвески, 3 – груз из негигроскопичного материала (например, металла), 4 – груз из гигроскопичной древесины (тонкий кругляк из поперёк распиленной рыхлой лёгкой древесины типа липы или сетка с опилками и стружками). При повышении относительной влажности воздуха древесина увлажняется и увеличивается

в весе, что приводит к наклону коромысла в сторону гигроскопичного груза.

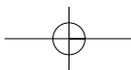
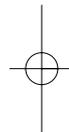
поверхности раскалённых камней. В соответствии с этой теорией и клубы «белого» пара из чайника представляются первичным актом «испарения» воды в чайнике. Затем эти крупные частицы «белого» пара «испаряются» (якобы диссоциируют) вновь уже с образованием микроскопических невидимых глазом частиц воды. Ясно, что все эти соображения являются следствием незнания молекулярной теории веществ, а отсюда и неспособности представить себе конденсированную воду в виде совокупности взаимодействующих молекул, из которой, преодолевая барьер, могут вылетать в воздух отдельные наиболее энергичные молекулы воды (способные разорвать «узы» взаимного притяжения), как раз и образующие пар в виде газа.

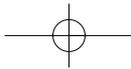
В этой книге мы не имеем возможности обсуждать многочисленные бытовые (зачастую очень хитроумные, но дремучие) представления, столь характерные именно для бань. Эта книга предусматривает знакомство с физикой хотя бы на уровне школьной программы. Мы чётко отличаем компактную, жидкую воду, налитую в сосуд, от диспергированной (раздробленной) жидкой воды в виде крупных капель и брызг и/или в виде мелких капель – аэрозолей (медленно опускающихся в воздухе) и/или в виде ультрамелких капель-тумана и дымки (практически не опускающихся в воздухе). Водяной же пар (водяные пары) – это не вода и не жидкость (пусть даже мелко раздробленная), а газ, это отдельные молекулы воды в пространстве, причём эти молекулы воды настолько далеки друг от друга, что практически не притягиваются друг другу (но иногда взаимодействуют в результате соударений и из-за этого способны постоянно объединяться – конденсироваться при низких скоростях столкновений молекул). Молекулы воды (в виде водяного пара в бане) всегда находятся в среде молекул воздуха, образуя особый газ – влажный воздух, то есть смесь воздуха с водяным паром (смесь молекул воды, азота, кислорода, аргона и других компонентов, составляющих воздух). И если этот влажный воздух является горячим, то его



в банях называют «паром». Диссоциированными же парами воды называются диссоциированные молекулы воды $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}$, образующиеся при температуре выше 2000°C . При ещё более высоких температурах свыше 5000°C образуются различные ионизированные пары воды $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}^+ = \text{OH}^- + \text{H}_3\text{O}^+ = \text{OH} + \text{H}^+ + e$. Ионизация может происходить и при низких температурах паров, но при электронных или ионных облучениях, например, в тлеющем или коронных электрических разрядах в воздухе.

Пары воды, как и любой газ (или любой пар, например, испаряющегося бензина), невидимы, а туман, являясь не газом, а мелкими капельками воды, рассеивает свет и видим в виде белого «дыма». Каждый день мы можем наблюдать, как из чайника или из-под крышки кастрюли выходит пар воды, охлаждающийся в воздухе. При выходе из чайника он, сначала невидимый (в виде газа), постепенно охлаждаясь в носике чайника, начинает конденсироваться и превращаться в струи тумана («клубы пара»). Затем капельки тумана смешиваются с воздухом и, если он достаточно сухой (то есть способен принять влагу), вновь испаряются и «пропадают». В банном быту под паром обычно правильно понимают именно невидимые пары воды в воздухе, в том числе паром называют сам горячий влажный воздух в бане: «в бане горячий пар» или «в бане холодный пар». Туман в бане в виде «клубов пара» является нежелательным явлением. Туман образуется при залповом проникновении холодного воздуха через раскрывающиеся двери во влажную баню, а также при поддачах на недостаточно прогретые камни при низких температурах воздуха в бане (точно так же, как туман образуется при выходе пара из чайника). В любом случае образование тумана можно предотвратить повышением температуры пара, а также повышением температуры и снижением влажности воздуха, в который поступает пар (см. раздел 7.5). Если в бане виден туман, то говорят, что пар в бане «сырой» (см. раздел 7.6). Если при входе в баню лицо чувствует влагу (потеет) и очки запотевают, то говорят, что пар «влажный», а если лицо не ощущает влагу – пар «сухой». Конечно же сам водяной пар (как газ) сухим, сырым или влажным быть не может, правильней было бы говорить сухой, сырой или влажный воздух. В профессиональном жаргоне сантехников зачастую применяют технические термины «мокрый» или «влажный» пар, когда хотят пояснить, что в магистральном паропроводе (например, подающем пар непосредственно в парилку городской бани) имеется конденсированная вода (в том числе в виде тумана). Термины «сухой», «перегретый» или «острый» пар используются тогда, когда труба магистрального паропровода внутри сухая, а пар внутри трубы не содержит тумана. Таким образом, терминология бывает совершенно разной, так что порой требуются





ся дополнительные разъяснения. Научная, профессиональная и бытовая терминологии, как правило, не совпадают.

4.3. Процессы испарения и конденсации

В специальной банной литературе (в том числе и финской) обычно ограничиваются сведениями о плотности насыщенного пара и определением понятия относительной влажности воздуха. При этом делают вывод о том, что чем ниже относительная влажность воздуха, тем больше влаги способен принять воздух и тем более интенсивны процессы испарения пота с тела человека.

При всей очевидности этого тезиса, сам подход методически неточен, поскольку низкая относительная влажность воздуха отнюдь не гарантирует возможность испарения влаги с кожи человека именно в банных условиях, когда температура воздуха превышает температуру кожи человека. Кроме того, если воздух и тело человека имеют разные температуры, то понятие относительной влажности воздуха вообще теряет физический смысл применительно к телу человека.

Поясим это простейшим примером. Предположим, термометр (сухой) в бане показывает 90°C , а гигрометр относительную влажность 25%. Казалось бы, баня сухая, и тело человека должно быть сухим. Но если вы смочите кожу водой, сохнуть она не будет. В то же время полки в бане, листья на венике и волосы на голове сохнут. Объясняется это тем, что полки, листья и волосы имеют ту же температуру, что и воздух, а ваше тело нагреться выше 40°C не может, вы просто выскочите из бани, если перегреетесь. Значит, ваше тело неминуемо представляет собой холодный элемент бани, около которого воздух охлаждается, а относительная влажность воздуха около тела человека повышается.

В цифрах это выглядит следующим образом. Плотность насыщенного пара при 90°C составляет $0,40 \text{ кг/м}^3$ (по рис. 23). Поскольку относительная влажность воздуха равна 25%, то абсолютная влажность воздуха $0,10 \text{ кг/м}^3$. Плотность насыщенного пара при 40°C составляет $0,05 \text{ кг/м}^3$. Это означает, что воздух с реальной абсолютной влажностью $0,10 \text{ кг/м}^3$, соприкасаясь с телом человека, охлаждается до 40°C и уже не может иметь абсолютную влажность выше $0,05 \text{ кг/м}^3$, то есть водяные пары должны частично (наполовину) сконденсироваться на коже человека в виде росы. Воздух при этом осушается на коже человека точно также, как на теплообменных охлаждающих пластинах кондиционера. Если вы махнете рукой, направив поток воздуха к телу, количество осаждающейся росы увеличится, а так как осаждение росы сопровожда-

ется выделением теплоты конденсации пара, то одновременно с росой вы почувствуете нагрев кожи. Это именно то, что происходит в русской бане при парении веником. То есть, казалось бы, при относительной влажности 25% ваше тело в бане должно быть сухим, как и ваши волосы. Но на самом деле, мокрая кожа вовсе не сохнет, более того, «пот» течёт «ручьём». Да и не пот это вовсе, а конденсат водяных паров из воздуха, жгучий, пощипывающий кожу. То есть баня с сухим воздухом может быть не сухой, а паровой.

Процесс осаждения росы (конденсата) может приостановиться лишь при осушении воздуха до абсолютной влажности $0,05 \text{ кг/м}^3$, после чего абсолютная влажность изменяться не будет. С другой стороны, если вы входите в баню (с любой температурой, например, 90°C), воздух которой имеет абсолютную влажность ниже $0,05 \text{ кг/м}^3$, то за счёт испарения пота и выделения влаги дыханием абсолютная влажность воздуха в бане будет увеличиваться до того же значения $0,05 \text{ кг/м}^3$, соответствующего плотности насыщенного пара при 40°C . Иными словами, при абсолютной влажности воздуха $0,05 \text{ кг/м}^3$ (или, что то же самое, при точке росы воздуха, равной 40°C) ни процессы испарения воды с кожи человека (в том числе и пота), ни процессы осаждения росы (конденсата) на кожу человека становятся невозможными.

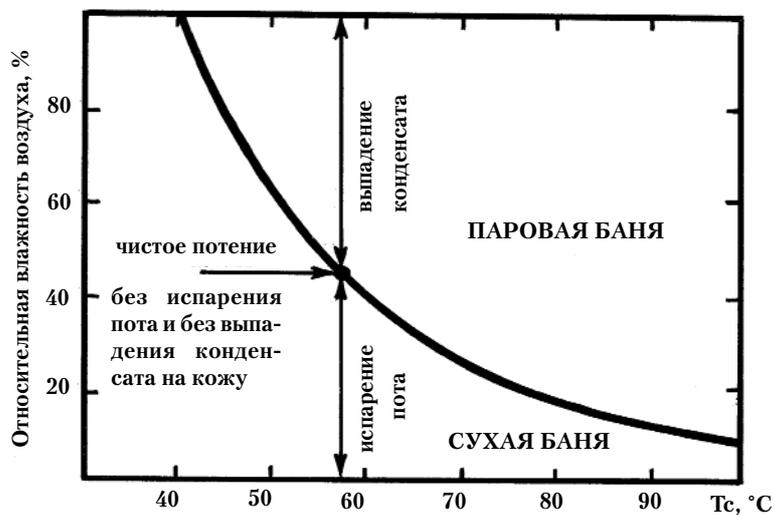


Рис. 29. Теоретическая зависимость относительной влажности воздуха от температуры T_c при фиксированной абсолютной влажности воздуха $0,050 \text{ кг/м}^3$ (при точке росы 40°C). Представляет собой хомотермальную кривую для 40°C , разделяющую режимы испарения пота и осаждения конденсата из воздуха.

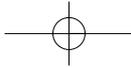
На рис. 29 представлена зависимость относительной влажности воздуха от температуры при фиксированной абсолютной влажности воздуха $0,05 \text{ кг/м}^3$ (при точке росы 40°C). Эта зависимость (кривая росы, конденсационная кривая) имеет фундаментальный (объективный) характер и описывает условия перехода от режимов испарения пота к режимам конденсации паров воды на кожу человека. Режимы ниже кривой соответствуют сухим баням, то есть таким, в которых пот может испаряться. Режим на кривой соответствует влажным баням, в которых пот перестает испаряться вовсе (режимы «чистого» потения). Режимы выше кривой соответствуют паровым баням, в которых пот не испаряется и, более того, на кожу выделяется горячая роса. Таким образом, воздушносухие бани с сухим воздухом (с относительной влажностью воздуха меньше 50%) могут быть и сухими, и влажными, и даже паровыми. Аналогично, воздуховлажные бани с влажным воздухом (с относительной влажностью воздуха более 50%) также могут быть и сухими, и влажными, и паровыми, что полностью снимает все терминологические трудности.

Кривую на рис. 29 назовём хомотермальной* (от латинских слов «homo» – человек и «thermae» – тёплое купание). *Хомотермальная кривая отвечает реальным климатическим условиям бань всех типов – турецких, русских, финских...* Для всех бань характерна одна и та же абсолютная влажность воздуха порядка $0,05 \text{ кг/м}^3$, что с первого взгляда может показаться крайне удивительным. Но всё становится очевидным, если учесть, что *хомотермальная кривая соответствует климатическим условиям, когда человек теряет способность к саморегулированию температуры своего тела, поскольку теряет возможность испарять воду со своей кожи*. При этом мокрое тело человека начинает непрерывно перегреваться. Это означает, что человеку даже с мокрой кожей не может быть холодно в режимах на хомотермальной кривой и выше (при отсутствии лучистых теплопотерь).

Многие люди, в том числе и врачи, по наивности полагают, что климатические режимы различных традиционных бань специально разработаны «многовековым опытом многочисленных поколений предков». Это глубочайшее заблуждение. Других режимов просто не существует в природе. Эти режимы реализуются «сами собой» при подборе условий, когда человеку становится тепло.

Неуклонное повышение температуры тела означает, что рано или поздно человек даже с мокрой кожей перегреется и будет вынужден выйти из бани. Иными словами, длительное непрерывное нахождение

* Условный термин «хомотермальность» был впервые введён автором совместно с Е.К. Дерлятко в 2002 году (Ю.М. Хошев. БАНБАС, 5/23, 2002 г., стр. 46).



в условиях, описываемых хомотермальной кривой, несовместимо с жизнью. Поэтому для конструирования бань важно понять не только то, что при определённой температуре воздуха человек способен длительно выдержать лишь некоторую максимальную относительную влажность воздуха, о чём так много пишут в литературе. Ещё более важно понять, что вне зависимости от температуры человек способен непрерывно выдерживать лишь некоторую максимальную абсолютную влажность воздуха (не выше $0,05 \text{ кг/м}^3$). Конечно, люди охладившись, способны кратковременно вынести и значительно более высокие влажности, но только кратковременно (времена переносимости будут установлены в разделе 5.3).

Таким образом, измерив температуру и относительную влажность воздуха, мы, вопреки заявлениям финских методистов, ничего не можем сказать о бане, не сопоставив полученные данные с хомотермальной кривой. Измерение же точки росы воздуха сразу же однозначно укажет на характер климатических условий. Поскольку приборы по определению точки росы весьма сложны для бань, то любителям бани для изучения особенностей своей бани можно порекомендовать крайне упрощённые «приборы» не по измерению, а по контролю точки росы: вёдра, наполненные водой с температурой 40°C или блестящие пластинки, прикреплённые к телу человека (металлические никелированные браслеты или даже обычные металлизированные липкие плёнки-ленты типа скотча). При достижении точки росы 40°C (хомотермальный режим) на вёдрах, браслетах или липких плёнках, протираемых сухим полотенцем, появятся капли росы (запотевание).

Баннный воздух, соответствующий хомотермальному режиму, можно моделировать воздухом, выдыхаемым из лёгких, поскольку он тоже имеет абсолютную влажность, близкую к $0,05 \text{ кг/м}^3$. Поэтому в быту иногда говорят о душных помещениях – «надышали как в бане». В нормальной бане если дыхнуть на зеркало, роса (в виде запотевания) не должна образовываться никогда. Для ориентировки отметим, что в холодное время года образование тумана в выдыхаемом воздухе («пара» изо рта) происходит при температуре атмосферного воздуха ниже плюс $8\text{--}10^\circ\text{C}$. При более высоких температурах туман при дыхании уже не виден, но роса при дыхании на зеркало выделяется вплоть до температур зеркала $30\text{--}35^\circ\text{C}$. Температуры появления росы и тумана в этих условиях существенно ниже точки росы воздуха 40°C по причине затруднённости зарождения первичных мельчайших капель конденсата с выпуклой поверхностью, а также ввиду подогрева поверхности зеркала и внешнего воздуха тёплым выдыхаемым воздухом. Аналогичное явление наблюдается и при истечении влажного тёплого воздуха из бани наружу.

4.4. Бани сухие, влажные и паровые

Продолжим рассмотрение случая, когда температуры всех элементов бани равны, и только человек имеет иную, более низкую температуру. Возможный лучистый нагрев или лучистое охлаждение тела человека как и прежде пока не учитываем.

Мы уже установили, что перенос обычных атмосферных метеорологических представлений в банные условия не корректен и приводит к неправильным заключениям именно потому, что тело человека в бане холоднее воздуха, а в обычной жизни наоборот. Такие же недоразумения могут возникнуть и при попытках бездумного использования понятия относительной влажности в неживой природе. Так, например, прогноз погоды (метеосводка) о предстоящем снижении относительной влажности воздуха воспринимается в народе как однозначное свидетельство того, что на улице будет сухо, лужи начнут быстро высыхать. Действительно, всё, что имеет температуру воздуха (то есть всё, что успевает охладиться или нагреться строго вслед за изменяющим свою температуру воздухом), будет безусловно сохнуть: листья на деревьях, бельё на верёвке, скамейки. Но массивные дома и крупные водоёмы изменяют свою температуру крайне медленно. Кроме того, их температура практически всегда ниже температуры воздуха (как и человека в бане). Поэтому они будут быстрее сохнуть лишь при снижении абсолютной влажности воздуха, а не относительной (которая, к тому же попросту теряет физический смысл в этих условиях). На самом деле, если снижение относительной влажности воздуха сопровождалось повышением температуры (установилась жара) так, что абсолютная влажность воздуха реально увеличилась (а на практике это наблюдается, как правило, всегда), то крупные лужи и стены массивных домов станут сохнуть в жару не быстрее, а медленней (и даже, может быть, наоборот, будут не сохнуть, а увлажняться за счёт выпадения конденсата

из воздуха). Всем известно, что вода в бассейнах испаряется преимущественно ночью в прохладном воздухе, а вовсе не днём в жарком воздухе. Так что прогноз пого-

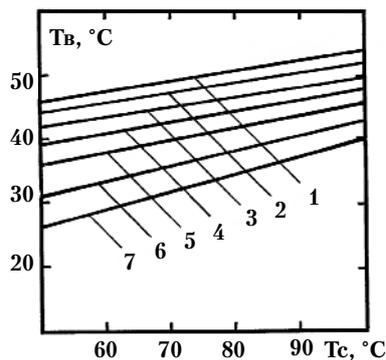


Рис. 30. Теоретические зависимости показаний влажного термометра T_w от показаний сухого термометра T_s при различных абсолютных влажностях воздуха (точках росы): 1 – 0,07 кг/м³ (46°C), 2 – 0,06 кг/м³ (43°C), 3 – 0,05 кг/м³ (40°C), 4 – 0,04 кг/м³ (37°C), 5 – 0,03 кг/м³ (32°C), 6 – 0,02 кг/м³ (25°C), 7 – 0,01 кг/м³ (15°C).

ды сам по себе требует дополнительного анализа. Но если бы в метеосводках сообщали не относительную влажность воздуха, а абсолютную, а ещё лучше точку росы воздуха, то никаких недоразумений такого плана не было бы. То же самое можно сказать о бане.

Показания влажного термометра указывают, к какой температуре будет стремиться тело со смоченной поверхностью в бане при заданных метеословиях. На рисунках 30 и 31 приведены расчётные зависимости показаний влажного термометра от температуры воздуха (по сухому термометру) и от точки росы. Ясно, что климатические режимы с температурой по влажному термометру ниже 40°C банными, строго говоря, не считаются, поскольку

незагорячённый человек в этих условиях при смачивании кожи водой может испытывать охлаждение тела. Но поскольку точка росы T_p всегда ниже температуры по влажному термометру T_w и температуры по сухому термометру T_c ($T_p \leq T_w \leq T_c$), то возможны банные режимы с точкой росы ниже 40°C , то есть ниже хомотермальной кривой.

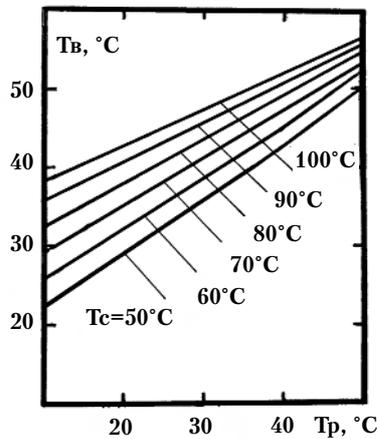


Рис. 31. Теоретические зависимости показаний влажного термометра T_w от точки росы воздуха T_p при различных показаниях сухого термометра T_c .

незагорячённый человек в этих условиях при смачивании кожи водой может испытывать охлаждение тела. Но поскольку точка росы T_p всегда ниже температуры по влажному термометру T_w и температуры по сухому термометру T_c ($T_p \leq T_w \leq T_c$), то возможны банные режимы с точкой росы ниже 40°C , то есть ниже хомотермальной кривой.

На рис. 32 представлены метеорологические условия, соответствующие показаниям влажного термометра 40°C и 50°C . Забегая вперёд, укажем, что кривая 2 соответствует ощущению комфортного тепла у человека с мокрой кожей, причём время прогрева тела до температуры 39°C (время переносимости банной температуры и влажности по данным раздела 5.3) достигает нескольких часов (без учёта влияния инфракрасного излучения). В этих условиях, отвечающих режимам «привыкания», человек в бане начинает незаметно для себя всё сильнее потеть, но часть пота всё же ещё испаряется, не позволяя человеку сильно перегреться. Этот режим, характерный для сухих турецких бань, мало знаком русским и финским любителям бань. В частности, этот режим реализуется и в инфракрасных кабинах, имеющих дополнительный лёгкий нагрев лучистым теплом (см. раздел 4.6). Кривая 3 соответствует временам переносимости порядка 10 минут (без учёта влияния инфракрасного излучения). Область между кривыми 2 и 3 соответствует типичным банным метеорежимам. Хомотермальная кривая 1, естественно, находится в этой области. По сути, рис. 32 констатирует очевидный факт: банные режимы находят-

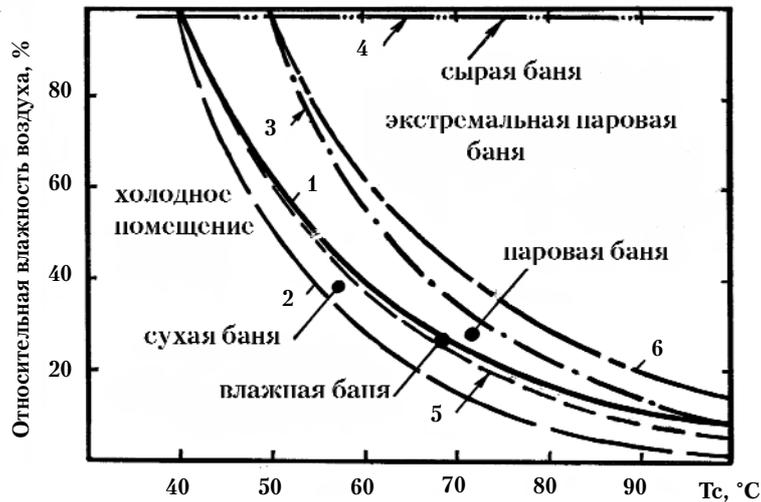


Рис. 32. Теоретические зависимости относительной влажности воздуха от температуры воздуха T_c (по сухому термометру): 1 – при фиксированной точке росы $T_r = 40^\circ\text{C}$ (хомотермальная кривая), 2 – при фиксированной температуре по влажному термометру $T_v = 40^\circ\text{C}$, 3 – при фиксированной температуре по влажному термометру $T_v = 50^\circ\text{C}$, 4 – при относительной влажности 100%, 5 – при равенстве скоростей конвективного нагрева и охлаждения за счёт испарения воды с кожи в условиях обдува, 6 – при фиксированной точке росы $T_r = 50^\circ\text{C}$.

ся не только на хомотермальной кривой, но и в некоторой области около неё. Причём каждый человек выбирает себе банный метеорежим в соответствии со своими предпочтениями и техническими возможностями своей бани. Некоторые любят погорячее – метеорежимы выше кривой 3 с временем непереносимости менее 10 минут относятся к экстремальным. Прогретьшись (или перегретьшись), можно с комфортом принять мытную процедуру в климатической области ниже кривой 2, которую с неразогретым организмом воспринимают как прохладную для тела и свежую для лёгких. На рис. 32 видно, что в финских саунах при температурах выше 100°C все режимы (сухие, паровые) находятся в узкой области относительных влажностей 2–10% по гигрометру (Ю.М. Хошев. БАНБАС, 2/26, 2003 г., стр. 38). На рис. 33 представлены те же климатические кривые, что и на рис. 32, но в координатах «абсолютная влажность – температура». При этом хомотермальная кривая преобразуется в горизонтальную прямую 1, соответствующую фиксированной абсолютной влажности $0,05\text{ кг/м}^3$ (точке росы 40°C). Банные метеоусловия распо-

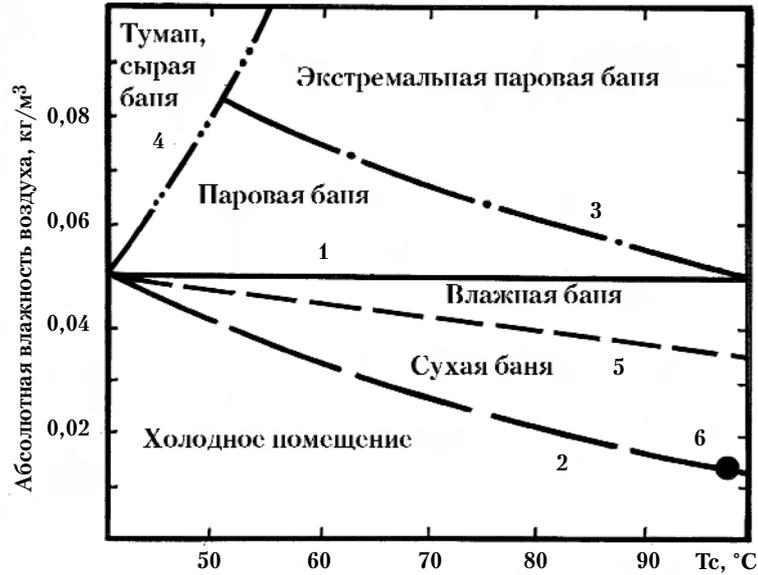


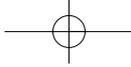
Рис. 33. Теоретические зависимости абсолютной влажности воздуха от температуры воздуха T_c (по сухому термометру): 1 – при фиксированной точке росы $T_p = 40^\circ\text{C}$ (хомотермальная кривая), 2 – при фиксированной температуре по влажному термометру $T_v = 40^\circ\text{C}$, 3 – при фиксированной температуре по влажному термометру $T_v = 50^\circ\text{C}$, 4 – при фиксированной относительной влажности 100% (соответствует плотности насыщенных паров воды), 5 – при равенстве скоростей конвективного нагрева и охлаждения за счёт испарения воды с кожи в условиях обдува, 6 – идентификационная точка для рис. 65 (точка 4) и рис. 66.

лагаются, как и прежде, между кривыми 2 и 3 и разделяются условно на паровую баню (выше хомотермальной кривой), влажную и сухую баню (на хомотермальной кривой и ниже). Выше кривой 3 располагается климатическая зона экстремальных бань (с температурой по влажному термометру выше 50°C). Ниже кривой 2 располагаются метеорежимы, при которых холодно с мокрой кожей (но тепло с сухой кожей), но если тело человека нагреть при этом лучистым теплом (инфракрасным излучением) от нагретых поверхностей, то метеорежимы ниже кривой 2 могут стать банными. Это реализовывалось в лаконикумах с «сухим жаром» от жаровень и в сухих саунах с потоком лучистого тепла с горячего потолка (см. раздел 8).

На рис. 33 в дополнение к предыдущим соображениям введена дополнительная метеозона, располагаемая вниз от хомотермальной кривой 1 до кривой 5. Дело в том, что хомотермальные метеорежимы отвечают отсутствию процессов испарения влаги с кожи человека и процессов конденсации паров воды из воздуха на кожу человека. При этом в неподвижном воздухе человеку не становится ни теплей, ни холодней при смачивании кожи водой (в том числе и потом). Но появление воздушных потоков приводит к дополнительному нагреву тела тёплым воздухом за счёт конвективной составляющей, а процессы испарения, которые могли бы скомпенсировать этот нагрев, на хомотермальной кривой не возникают. Поэтому на хомотермальной кривой воздух, обдувающий тело человека, воспринимается как тёплый. А вот на кривой 5 этот дополнительный конвективный нагрев полностью компенсируется охлаждением за счёт испарения, и человек, хотя и ощущает факт появления механических воздушных потоков, тем не менее не чувствует ни нагрева кожи, ни её охлаждения. То есть на кривой 5 человеку с мокрой кожей не становится ни теплей, ни холодней при появлении движения воздуха. Столь тонкие нюансы характерны для ощущений мокрого тела человека. Человеку же с сухой кожей тепло (жарко) на всей площади рис. 33 вне зависимости от наличия или отсутствия потоков воздуха. Это очень важно для анализа субъективных ощущений человека в бане (см. раздел 6).

Схема метеорежимов на рис. 33 наиболее полно описывает климатические особенности бань, но без учёта лучистого нагрева, то есть в том предположении, что стены и потолок бани имеют температуру, равную или близкую температуре кожи человека в бане 40°C . Это, например, можно реализовать, обдувая в обычной жилой комнате тело человека феном. Или можно обить все стены бани зеркально отражающей полированной алюминиевой фольгой с малым коэффициентом поглощения. В реальных же банях температуры стен и потолков выше 40°C . Это значит, что надо пользоваться понятием не просто влажного термометра (экранированного), а влажного термометра, нагреваемого также и лучистым теплом. Показания такого термометра, конечно же, будут выше показаний экранированного влажного термометра. Поэтому с учётом лучистого нагрева кривые 2 и 3 на рисунке 33 опустятся вниз (или сдвинутся влево) при высоких температурах, а значит сухая баня станет жарче.

Руководствуясь зависимостями на рис. 33, можно оценить те количества воды, которые необходимо испарить (например, с помощью каменки), для получения влажных или паровых режимов. Легко видеть, что без дополнительного увлажнения воздуха получить паровой режим из сухого невозможно, точно так же, как невозможно перейти от паровой бани к сухой без осушения воздуха. В то же время сам воздух можно сделать сухим из



влажного (по гигрометру) простым нагреванием без осушения, поскольку относительная влажность воздуха при постоянной абсолютной влажности может меняться в широких пределах при изменении температуры.

На рисунках 32 и 33 приведена также кривая 4 температурной зависимости плотности насыщенного пара, выделяющая зону туманообразования. Туман в виде «клубов пара» можно наблюдать (либо при охлаждении паровой бани, либо при поддачах при низких температурах воздуха) только лишь в зоне выше кривой 4. Бани, соответствующие кривой 4, имеют относительную влажность 100% и называются сырыми, поскольку в них не сохнут ни полы, ни полки, ни потолки. Обычно эти бани заполнены туманом («клубами пара») и при температурах выше 50°C являются обжигающими.

4.5. Аэродинамика бани

Выше мы рассматривали изотермическую баню, все элементы которой имеют одну и ту же температуру, кроме тела человека, которое нагреться выше 40°C не может по чисто физиологическим причинам. Но в реальности печь, пол, стены и потолок бани имеют разные температуры, отличающиеся от температуры тела человека. При этом в бане всё неминуемо перемешивается и усредняется потоками воздуха. При всей запутанности картины можно выделить основные процессы, позволяющие понять суть происходящего.

Рассмотрим частный, но очень наглядный пример чёрной бани (дымной сауны), схема которой приведена на рис. 34. При протопке чёрной бани холодный воздух от открытой двери 2 по полу поступает в зону очага 1, нагревается и в виде смеси с дымовыми газами поднимается вверх, растилаясь по потолку, и выходит наружу через верхнюю часть двери. Такая аэродинамическая траектория называется вентиляционной 3 приточно-вытяжной кривой и является разомкнутой (вернее замыкающей вне помещения). Если временно прикрыть дверь 2, то потоки воздуха отнюдь не исчезнут, поскольку причиной их возникновения является очаг, нагревающий воздух. Получившаяся при закрытых дверях траектория движения

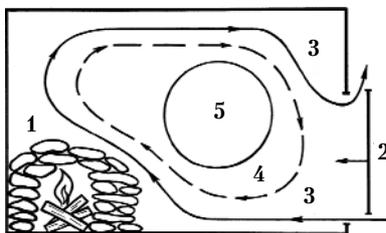


Рис. 34. Динамика воздушных потоков в чёрной (курной) бане (дымной сауне). 1 – открытый очаг из камней, желательнее со сводом, 2 – прикрываемая дверь, 3 – вентиляционный поток при открытых дверях, 4 – циркуляционный поток, 5 – застойная зона.



воздушных масс (в том числе и дымовых) называется циркуляционной (рециркуляционной) кривой и является замкнутой. Именно циркуляционные потоки приводят к задымлению помещения, а также к нагреву стен и полов нисходящими потоками горячего воздуха (дымовых газов). Так, при протопке очага с открытыми дверями нельзя ходить по помещению, размахивая руками, поскольку возникающие при этом перемешивания воздуха (циркуляционные потоки) тотчас нарушают ламинарно текущие вдоль потолка потоки дыма, и помещение полностью задымляется.

В реальных условиях циркуляционные и вентиляционные потоки воздуха обычно существуют одновременно. Причём для понимания банных процессов главным является циркуляционный поток. Только зная его траекторию в каждом конкретном помещении, можно расположить приточные и вытяжные отверстия таким образом, чтобы полностью «разомкнуть» при необходимости циркуляционную кривую и тем самым организовать эффективную вентиляцию. Кроме того, в помещениях бань обычно имеется одна или несколько застойных зон (в том числе и под полками), движение воздуха в которых может быть создано лишь дополнительными факторами (передвижением людей, взмахами веников, вентиляторами и т. п.).

Протопив чёрную баню, погасив очаг и закрыв дверь, мы уже не видим циркуляционных клубов дыма, поскольку их попросту нет. Но циркуляционные потоки воздуха не исчезают, поскольку раскалённые камни нагревают воздух так же, как пламя очага. Если плеснуть воду на камни, то горячий увлажнённый воздух будет двигаться по циркуляционной траектории (точно так же, как задымлённый при временном прикрытии дверей топящейся бани). В отличие от задымлённого воздуха горячий увлажнённый воздух, достигая холодного пола, может не только охлаждаться, но и осушаться за счёт выделения конденсата (росы или тумана). Если охлаждение воздуха на полу тотчас компенсируется последующим нагревом над камнями, то осушение воздуха ничем не компенсируется (если только не поддавать на камни постоянно). Поэтому как ни увлажняй однократными поддачами движущийся в чёрной бане воздух, всё равно он неминуемо осушится через два-три циркуляционных оборота. Это свидетельствует о том, что чёрная баня с мощным тепловыделением и холодным полом способна давать мощные волны горячего пара, распространяющиеся на весь объём бани, но в то же время быстро исчезающие. Без поддач такая баня является сухой.

Вышеприведённые соображения лежат в основе теории чёрных бань и курных изб (Ю.М. Хошев. БАНБАС, 6/24, 2002 г., стр. 58), но могут быть распространены на бани современных типов. В качестве исходной модели выберем схему современной сухой высокотемпературной сауны

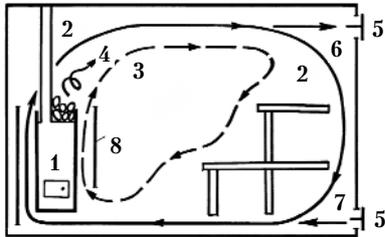


Рис. 35. Динамика воздушных потоков в модельной бане (сауне). 1 – металлическая печь с каменкой, 2 – циркуляционный поток воздуха, 3 – микроциркуляционный поток воздуха, стеснённый преградами (например, полками) и не способный достичь холодного пола, 4 – поток пара из каменки, подмешивающийся в циркуляционный поток, 5 – вентиляционное отверстие, 6 – вытяжной поток воздуха, 7 – приточный поток воздуха, 8 –

металлические листовые экраны от инфракрасного излучения (кожух печи), составляющие калорифер.

с холодным полом (рис. 35). Сауна содержит вместо очага металлическую печь 1 (на твёрдом, жидком или газообразном топливе или электрическую) с металлическими экранами 8 (кожухом), образующими калориферный нагреватель воздуха, и каменкой для поддач 4. Раскалённые (может быть, и докрасна) стенки печи создают в калориферном зазоре вертикальный поток воздуха 2, распространяющий тепло от печи (и пар от каменки) по всему объёму бани. Предположим условно, что общий объём сауны равен 10 м^3 , причём $7,5 \text{ м}^3$ из них заняты циркулирующим воздухом, а $2,5 \text{ м}^3$ – застойными зонами, печью и другими неподвижными предметами. Примем условно, что мощность нагрева воздуха равна 20 кВт , имея в виду при этом, что в металлических печах мощность теплоотдачи в воздух близка (сравнима) с мощностью, выделяющейся в топке печи от горения дров или нагрева тепловыделяющих электрических элементов (ТЭНов). Печь забирает холодный воздух с пола с температурой 20°C , нагревает до температуры 100°C и направляет к потолку. Исходя из теплоёмкости воздуха, скорость циркуляционного потока составит 900 кг/час , а в бане находится всего $7,5 \text{ кг}$ движущегося воздуха. Это означает, что весь воздух в сауне 120 раз в час проходит около печи, нагревается, увлажняется (при поддачах), затем по потолку и стенам (сверху вниз) достигает пола, охлаждается, осушается (выделяет конденсат в виде росы) и вновь поступает к печи для нагрева. Этот режим и называется сухой высокотемпературной сауной. Он стал возможным лишь в результате внедрения в банную практику металлических печей с мощной теплоотдачей. Характерной чертой этого режима является невозможность постоянного накопления влаги в воздухе, а также невозможность сохранения высокой влажности воздуха. Действительно, для получения в сауне объёмом 10 м^3 воздуха с абсолютной влажностью $0,05 \text{ кг/м}^3$ необходимо истратить $0,5 \text{ кг}$ воды. Стандартный парогенератор (кипятильник) мощностью $1,3 \text{ кВт}$ выдаёт столько пара за 20 минут.

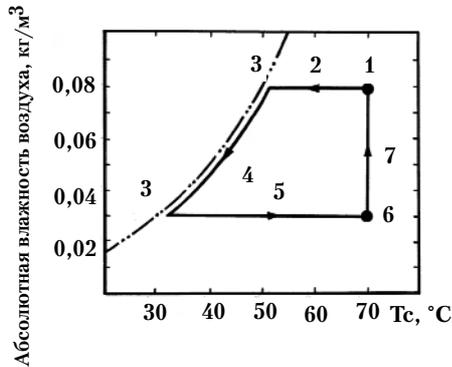


Рис. 36. Диаграмма изменения состояния воздуха в выделенном объёме, перемещающемся вдоль циркуляционной кривой в бане. 1 – исходная точка состояния (условная метеоточка у потолка бани), 2 – охлаждение без конденсации паров воды из воздуха, 3 – теоретическая зависимость плотности насыщенного пара от температуры, 4 – охлаждение с конденсацией паров воды из воздуха, 5 – нагрев воздуха около печи, 6 – метеоточка конца цикла без увлажнения, 7 – увлажнение воздуха паром, поступающим из каменки при подаче.

Но за это время увлажняющийся воздух успеет пройти около пола 40 раз, каждый раз осушаясь. Так что высокая влажность воздуха не может быть достигнута. Даже если 0,5 кг воды испарить «мгновенно» (то есть за несколько секунд в большой каменке с мощностью парообразования 300–1000кВт), то всё равно после кратковременного «парового толчка» через минуту вся вода окажется на полу.

На рисунке 36 представлена типичная диаграмма осушки воздуха в сауне. Увлажнённый воздух (например, с температурой 70°C и абсолютной влажностью 0,08 кг/м³), соответствующий исходной точке 1, в процессе циркуляционного движения в бане охлаждается на полу сначала до 50°C без конденсации (участок 2), а затем до температуры 30°C с выделением росы (участок 4), нагревается около печи до исходной температуры 70°C (участок 5). Замыкание цикла (переход от точки 6 к точке 1 на участке 7) требует увлажнения воздуха с 0,03 кг/м³ до 0,08 кг/м³, и если оно не происходит, воздух остаётся сухим.

Причиной указанного осушения воздуха является его крупномасштабная циркуляция при наличии в бане поверхностей более холодных, чем воздух, например, тела человека, пола, баков с холодной водой. При мелкомасштабной циркуляции (микротурбулентности), когда потоки воздуха не достигают холодных элементов, процесс осушки проявляется не столь отчётливо.

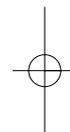
Снизим скорость циркуляции, для чего, прогрев каменку, гасим печь. При этом конструктивно получаем нечто похожее на протопленную «чёрную баню» с открытой каменкой, но размер каменки у металлической печи обычно значительно меньше, чем в чёрной бане – дымной сауне. Положим, что мощность каменки по нагреву воздуха составляет 2 кВт. Это означает, что скорость циркуляции сокращается со 120 раз до 12 раз в час (со 120 до 12 крат). То есть характерное время осушения увеличивается с полминуты до 5 минут. Это уже приличное время, и чело-



век отчётливо чувствует длительное увлажнение воздуха. Такая баня считается влажной, поскольку при длительных увлажнениях воздуха всё более характерным становится потоотделение в форме потения. Поскольку линейные скорости перемещения воздушных масс при погасании печи сокращаются с (0,1–1) м/сек до (0,01–0,1) м/сек, открывается возможность «вручную» воздействовать на потоки воздуха с помощью веника. Имеются в виду известные традиционные банные операции «разгона пара» по стенам и «посадка пара» на пол, обеспечивающие при необходимости быструю осушку воздуха, чтобы сделать «пар лёгким».

Ещё сильнее снизим скорость циркуляции воздуха в бане, для чего прикроем каменку теплоизолированной термостойкой крышкой. Предположим, что мощность теплоотдачи каменки снизится до 0,5 кВт. Кратность циркуляции снизится до 3 раз в час, а линейные скорости воздушных потоков – до (0,001–0,01) м/сек. Это уже практически неподвижный воздух. Вся баня будет представлять собой единую застойную зону, движение воздуха в которой полностью определяется движениями веника и перемещениями людей. Если в этих условиях увлажнить воздух, то высокая влажность будет сохраняться до 20 минут, а при полной изоляции каменки ещё дольше. Это значит, что воздух можно увлажнять не только мощной поддачей на камни, но даже и медленным накапливанием пара в воздухе за счёт испарений влаги с тела человека или воды с тёплого пола. Такая баня считается предельно влажной (и даже паровой) и не способной к быстрому изменению метеопараметров. Характерным примером такой бани с практически неподвижным воздухом является хаммам.

Выполненный анализ показывает, что в бане, как и в земной атмосфере, метеорологическая обстановка будет определяться тем, имеются или нет крупномасштабные перемещения воздуха. Если сильных подвижек воздуха нет, то погода будет формироваться исключительно местными явлениями нагрева, испарения и конденсации. Но если потоки воздуха возникают, то они могут принести с собой те метеоусловия, которые возникли, может быть, очень далеко от этой местности. Так, дожди в Финляндии, скорее всего, обуславливаются процессами испарения где-нибудь в Атлантике, а не в самой Финляндии, и приносятся перемещающимися циклонами. Применительно к человеку в бане это означает, что бани с неподвижным воздухом являются малоконтрастным и влажными, поскольку испарение пота (влаги) с кожи приводит к постепенному накапливанию влаги в воздухе вокруг человека точно так же, как в непроветренном помещении. Появление воздушных потоков делает баню контрастной, малопредсказуемой, способной давать и мощные волны жгучего пара, и быстро осушаться. То есть баня с подвижным воздухом может быть и паровой (преимущественно кратковременно), и сухой

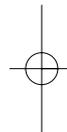
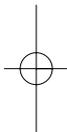


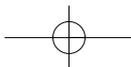


(долговременно) в зависимости от пространственного распределения метеоусловий вдоль траектории воздушных потоков (Б.А. Семенченко, Физическая метеорология, м.: Аспект-Пресс, 2002 г.).

Неподвижность воздуха в бане означает, что в ней могут находиться неперемешивающиеся между собой индивидуальные застойные зоны с разными метеопараметрами. Например, если в хаммаме обогреваемый пол мокрый и имеет температуру 55°C , то около него формируется застойная зона воздуха с температурой 55°C и абсолютной влажностью $0,1 \text{ кг/м}^3$, соответствующей плотности насыщенного пара при 55°C (то есть отвечающей относительной влажности воздуха 100% для 55°C). В то же время в метре от пола, где на каменных лежаках (может быть, и мокрых) с температурой 40°C лежат люди (может быть, и потные) с температурой кожи 40°C , процессы испарения и конденсации формируют иную застойную зону с температурой 40°C и абсолютной влажностью $0,05 \text{ кг/м}^3$ (с относительной влажностью воздуха 100% для 40°C). А наверху у свода потолка с температурой, например 30°C , формируется своя застойная зона с абсолютной влажностью воздуха $0,03 \text{ кг/м}^3$ (с относительной влажностью воздуха 100% для 30°C).

Таким образом неподвижность воздуха создаёт условия его 100%-ой относительной влажности во всём объёме такого модельного хаммама. В отличие от изотермического модельного сосуда (макета турецкой бани) из раздела 4.2, здесь 100%-ная относительная влажность воздуха может быть достигнута и в неизотермическом сосуде с разными температурами в разных застойных зонах (см. понятие сырого воздуха далее в разделе 7.6). Ясно, что гигрометр в такой неподвижной бане мало что может сказать парильщику. А вот распределение точек росы воздуха в объёме бани сразу однозначно определит всю метеообстановку. Так, даже в отсутствии потоков воздуха возникает диффузионный поток молекул воды в неподвижном воздухе из зон с высокой точкой росы (с высокой абсолютной влажностью воздуха) в зоны с низкой точкой росы (низкой абсолютной влажностью воздуха). Но поскольку воздух во всех зонах до предела насыщен водой (всюду имеет 100% относительную влажность), то это приводит к появлению процессов конденсации в зонах с низкой точкой росы в виде росы (в том числе и на телах людей) и в виде тумана (дымки). Если же возникают потоки воздуха, то они резко усиливают проникновение высоковлажных объёмов воздуха в холодные зоны с возникновением «клубов пара». Аналогичная картина наблюдается и в земной атмосфере при возникновении облаков, а также ночных туманов в холодном воздухе над тёплыми водоёмами. Обратим внимание, что воздух с относительной влажностью 100% (который до предела насыщен парами воды) тем не менее способен «испарять»



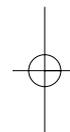


(в смысле принимать) воду, но только нагретую до температур более высоких, чем температура воздуха, и при этом обязательно образуется туман. Это объясняется тем, что около поверхности воды имеется тонкий пограничный слой воздуха, температура и абсолютная влажность которого выше, чем у окружающего воздуха. Пары воды из него диффундируют в окружающий воздух и там конденсируются.

Неподвижность воздуха в бане всегда создаёт у поверхности воды (будь то у мокрой полки или у потной кожи) застойные зоны с 100% относительной влажностью. Потоки же воздуха разрушат или перемешают застойные зоны. Поэтому появление движения воздуха может снизить относительную влажность, а может и «повысить» её, подразумевая, что превышение относительной влажности воздуха сверх 100% означает физически образование росы или тумана.

Анализ возможных последствий появления потоков воздуха в бане наиболее нагляден в форме модельных умозрительных перемещений выделенного объёма воздуха вдоль траектории возможных воздушных потоков. Имея в виду, что точка росы воздуха в изолированном выделенном объёме постоянна (также как и абсолютная влажность воздуха) вне зависимости от факта охлаждения или нагрева воздуха в выделенном объёме, легко предугадать, будет ли воздух в выделенном объёме увлажняться или осушаться при нарушении изоляции, то есть при контакте с элементами бани с той или иной температурой. Если точка росы воздуха ниже температуры элемента бани (пола, полка, потолка, тела человека и т. п.), то происходит испарение воды (если она есть) с поверхности элемента и увлажнение воздуха. И наоборот, если точка росы воздуха выше температуры элемента, то происходит конденсация водяных паров из воздуха и осушение воздуха.

Анализ будет сложнее, если оперировать понятием относительной влажности воздуха, которая изменяется с изменением температуры воздуха в выделенном объёме. В этом случае будут полезны конденсационные кривые, соответствующие постоянным точкам росы (постоянным абсолютным влажностям) воздуха (рис. 37). По известным температуре и относительной влажности воздуха необходимо определить местоположение метеоточки А, и если она располагается ниже конденсационной кривой, то будет наблюдаться испарение воды с поверхности элемента, а если выше, конденсация паров на поверхность элемента. Так, метеоточка А, изображённая на рис. 37, соответствует испарению воды с элементов с температурами 50°C (и выше) и конденсации водяных паров на элементах с температурой 40°C (и ниже). Охлаждение и нагрев воздуха в выделенном объёме соответствуют перемещению точки А по кривой А₁А₂, а потому не изменяют результатов выполненного выше анализа.



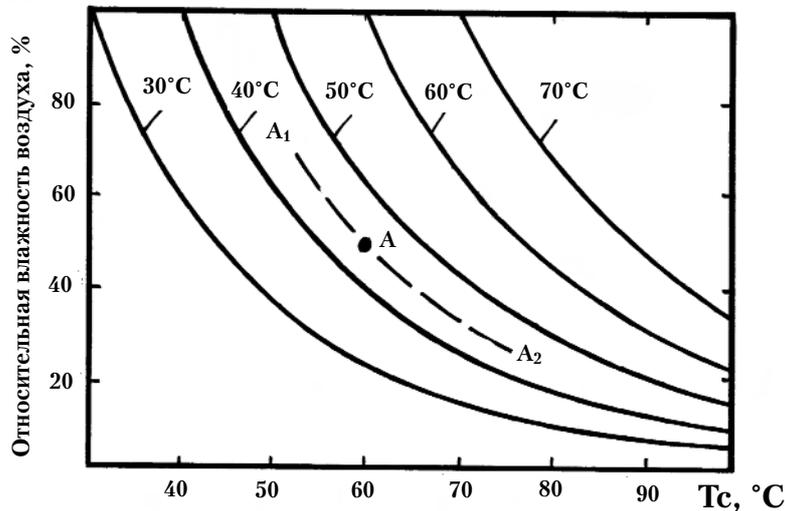


Рис. 37. Конденсационные кривые – теоретические зависимости относительной влажности воздуха (по гигрометру) от температуры воздуха T_c (по сухому термометру) при разных фиксированных точках росы воздуха T_r (указанных числами у кривых). Если условная метеоточка А расположена ниже конденсационной кривой для точки росы, равной температуре элемента, то происходит испарение влаги с поверхности элемента (потолка, стены, пола, полка, человека и т. п.). Если же точка А расположена выше конденсационной кривой для точки росы, равной температуре элемента, то происходит конденсация воды из воздуха на поверхность элемента. Кривая A_1A_2 представляет собой конденсационную кривую для такой температуры условного элемента, при которой не происходили бы ни конденсация, ни испарение с элемента в воздухе, описываемом метеоточкой А. При охлаждении или нагреве воздуха с исходными метеоусловиями, отвечающими точке А, точка А перемещается вдоль кривой A_1A_2 (при условии отсутствия процессов испарения и конденсации на элементы). Конденсационная кривая для температуры 40°C является хомотермальной кривой, см. рис. 29.

Указанные кривые могут быть использованы при анализе банных процессов по результатам измерения температуры и относительной влажности воздуха гигрометром.

Отметим, что подобный анализ абсолютно аналогичен рассуждениям, проведённым в разделе 5.3 при введении понятия хомотермальной кривой, которая, кстати, эквивалентна конденсационной кривой для температуры 40°C.

Основным выводом настоящего раздела является необходимость учёта не только охлаждения, но и осушения воздуха на холодных эле-



ментах бани. Это в общем-то тривиальное заключение, тем не менее очень часто недооценивается при проектировании и строительстве бань. Во-первых, по той причине, что ошибочно полагают основным параметром бани температуру, а не влажность воздуха. Действительно, чем горячее воздух, тем до более высокой температуры нагревается полок бани или, скажем, медальон на теле. Но если турецкую, например, баню залповым образом проветрить, то вернуть прежние тепловые для человека метеоусловия без повторного увлажнения воздуха не удаётся, хотя температура воздуха тотчас поднимется до прежних значений за счёт массивного тёплого пола и стен. При низких температурах бани (ниже 60–80°C) без увлажнения воздуха жары в бане не добиться. Во-вторых, привыкнув к факту непрерывного циркуляционного нагрева воздуха от печи (или от иного горячего элемента) и его охлаждения на потолке, стенах и полах, обеспечивающего прогрев помещения бани, порой забывают, что осушение воздуха на холодных элементах вовсе не компенсируется простым нагревом от печи – необходимо столь же постоянно и увлажнять воздух (например, поддачами или горячим влажным потоком в русской бане).

Если охлаждение воздуха определяется соотношением температур воздуха и холодного элемента, то осушение воздуха – соотношением точки росы воздуха и температуры холодного элемента. Скорость же осушения определяется разностью абсолютной влажности воздуха и плотностью насыщенного пара при температуре холодного элемента. А так как плотность насыщенного пара изменяется с температурой очень сильно (экспоненциально), то скорость осушки воздуха на холодном элементе растёт быстрее со снижением температуры холодного элемента, чем скорость охлаждения воздуха. Поэтому наличие сверххолодных элементов (например, ледяных полов) оказывает более сильное влияние на влажность нежели на температуру воздуха в бане. Это может привести к тому, что иная баня неплохо «держит температуру» (тем более за счёт постоянного подогрева воздуха стенами), но «не держит жар» в том смысле, что «не держит пар».

Бани, которые «не держат пар», называются сухими саунами. В сухих саунах обязательно имеется холодный элемент, осушающий воздух (либо имеется приточная вентиляция, подающая сухой воздух, см. раздел 8). Циркуляция воздуха в сауне повышает эффективность осушки воздуха на холодном элементе, поскольку подает на холодную конденсирующую поверхность большее количество влажного воздуха. В принятой конструкции финских сухих саун циркуляция воздуха достигается за счёт мощного восходящего воздушного потока у горячих стенок мощной металлической печи. Поэтому в России сухими саунами (или просто сауна-



ми) условно именуют в быту бани с мощной металлической печью и холодным полом, которые «не держат пар» в том смысле, что увлажнённый любым образом воздух тотчас осушается.

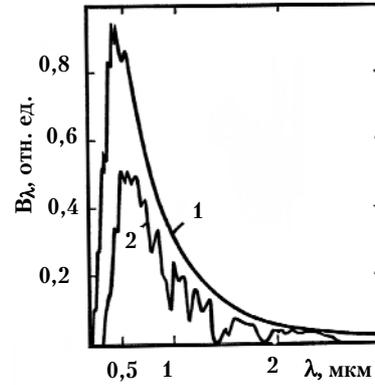
К баням, которые «держат пар», относятся хаммамамы и русские белые бани, поскольку они не имеют холодных элементов или, во всяком случае, постоянных мощных циркуляционных потоков. В русских парных белых банях с закрытой каменкой предусмотрена возможность быстрого осушения воздуха в бане с помощью веника, направляющего горячий влажный воздух на холодный пол («посадка пара»), а также быстрого увлажнения воздуха в бане с помощью поддач.

4.6. Процессы лучистого нагрева

В земной атмосфере воздушную метеобстановку дополняет наличие излучения Солнца, которое может кардинально изменить впечатление человека о погоде. Так и в бане на климатические параметры накладывается влияние теплового излучения от нагретых стенок печи, потолка, стен, излучателей.

Тепловое излучение (называемое также инфракрасным излучением, лучистым нагревом, лучистой теплопередачей, лучистым теплопереносом, радиационной составляющей теплового потока и т. п.) представляет собой электромагнитное излучение светового диапазона (называемого также светом, световой радиацией, световыми лучами, световым излучением, световыми волнами, квантами и т. п.). Световой диапазон волн 10^{-8} – 10^{-4} метров (от 0,01 мкм до 100 мкм) располагается между диапазоном радиоволн и диапазоном рентгеновских волн и отличается тем, что поглощается биологическими тканями с выделением тепла. Световой диапазон в свою очередь подразделяется на ультрафиолетовые лучи с длиной волны менее 0,4 мкм (0,315–0,400 мкм А-диапазон; 0,28–0,315 мкм В-диапазон; 0,200–0,280 мкм С-диапазон, менее 0,2 мкм – вакуумный ультрафиолет), видимые лучи (фиолетовые 0,40–0,42 мкм, синие 0,42–0,49 мкм, зелёные 0,49–0,53 мкм, жёлтые 0,53–0,59 мкм, оранжевые 0,59–0,65 мкм, красные 0,65–0,75 мкм) и инфракрасные лучи с длиной волны более 0,75 мкм (0,75–1,5 мкм А-диапазон; 1,5–3,0 мкм В-диапазон; более 3,0 мкм С-диапазон). На рис. 38 представлен спектральный состав излучения Солнца, охватывающий и ультрафиолетовые, и видимые, и инфракрасные лучи. Излучение Солнца по спектральному составу близко к излучению абсолютно чёрного тела при температуре 5600°С. Столь высоких температур в бане не бывает: высокоинтенсивные источники света типа софитов имеют температуру порядка 3000°С, обычные лампочки накаливания

Рис. 38. Спектральный состав излучения Солнца в относительных единицах: 1 – до прохождения атмосферы, 2 – после прохождения атмосферы с учётом поглощения компонентами атмосферы. Длина волны 1 мкм (микрометр, микрон) равна одной тысячной миллиметра (мм) и одной миллионной метра (м). Иногда микрон обозначается как 1 мк. Тысячная доля микрона называется миллимикроном 1 ммк (или нанометром 1 нм=1 ммк), который в свою очередь равен десяти ангстремам (1 Å=10⁻¹⁰ м).



2000°C, раскалённые угли в печи 1500°C, внутренние стенки топливника кирпичной печи 1000°C, стенки металлической печи 500°C, внешние стенки топливника кирпичной печи 100°C. Спектральный состав излучения поверхностей аналогичен составу излучения абсолютно чёрного тела (рис. 39) с поправкой на степень черноты поверхности. С уменьшением температуры излучающей поверхности очень быстро уменьшается общая мощность излучения (теплоотдача излучением), равная площади под кривой Планка $W = \epsilon \sigma (T + 273)^4$, где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²град⁴) – постоянная Стефана-Больцмана, (T+273) – абсолютная температура в градусах Кельвина, T – температура в градусах Цельсия (рис. 40). Кроме того, с уменьшением температуры излучающей поверхности спектральный состав излучения сдвигается в сторону инфракрасного излучения, и потому всё меньшая доля приходится на видимый диапазон. Максимум (пик) спектральной зависимости мощности излучения W_λ (кривой Планка) приходится по закону Вина на длину волны $\lambda_{\max}(\text{мкм}) = 2898 / (T + 273)$, где T – температура в градусах Цельсия °C. Если площадь

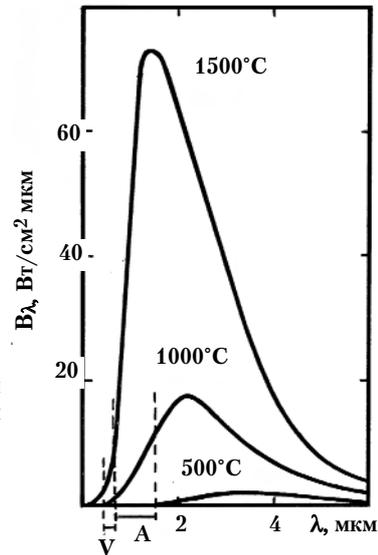
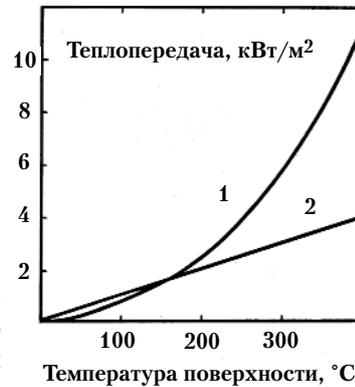


Рис. 39. Спектральный состав излучения абсолютно чёрного тела (кривая Планка) при различных температурах, указанных у кривых. Спектральный интервал V соответствует видимому диапазону. Спектральный интервал A соответствует ближнему диапазону инфракрасного излучения (A-диапазон 0,75–1,5 мкм).

Рис. 40. Полная (интегральная по спектру) теплоотдача абсолютно чёрной поверхности с температурами 0–400 °С во внешнюю среду с температурой 0 °С: 1 – инфракрасным излучением, 2 – теплопроводностью (кондуктивной теплопередачей). Мощность инфракрасного излучения $[\sigma(273+T)^4 - \sigma 273^4]$, является суммарной по всему спектру излучения в полное полупространство (во все стороны).



под кривой Планка принять равной 100%, то площадь под восходящей ветвью $\lambda < \lambda_{\max}$ составит 25%, а под нисходящей $\lambda > \lambda_{\max}$ составит 75% суммарной площади.

В результате с уменьшением температуры свечение раскалённой поверхности из ослепительно белого становится красным, а потом невидимым:

– ослепительно белый цвет	1300 °С и выше
– светло-жёлтый	1200 °С
– тёмно-жёлтый	1100 °С
– оранжевый	1000 °С
– красный	900 °С
– вишнёво-алый	800 °С
– тёмно-красный	700 °С
– коричнево-красный	600 °С
– тёмно-коричневый (заметен только в темноте)	500 °С

Таким образом, появление заметного видимого свечения поверхности, соответствующее температуре порядка 500 °С, уже отвечает мощностям теплового излучения порядка 20 кВт/м². Такая величина теплового потока является порогом воспламеняемости наиболее легко воспламеняемой группы ВЗ горючих материалов по ГОСТ 30402-96. То есть появление видимого свечения поверхности, например печей, может свидетельствовать не только о возможности травматических последствий касания, но и об опасности возникновения пожара в помещении, в том числе за счёт воспламенения материалов, даже не касающихся нагретых поверхностей. Все знают, как горячо стоять у раскалённой печки-«буржуйки» или у сильно разгоревшегося костра. Поэтому в целях безопасности для нагрева помещения предпочитают использовать инфракрасные излучатели с как можно более низкой температурой излучающей поверхности. Но меньшая мощность излучения низкотемпературных излучателей



приводит к необходимости использования больших площадей излучателей для обеспечения заданного уровня теплоотдачи. С этой точки зрения инфракрасными излучателями в оптимальном случае должны быть сами поверхности стен и потолка помещения. В этом смысле поступающее со всех сторон на тело человека инфракрасное излучение создаёт ощущение обычного тепла (как от тёплого воздуха) и ассоциируется в быту с более тёплыми метеорологическими условиями.

Наиболее знакомый для человека уровень мощности инфракрасного излучения – солнечная постоянная $1,4 \text{ кВт/м}^2$, равная интенсивности солнечного излучения, достигающего орбиты Земли. При прохождении через земную атмосферу солнечное излучение ослабляется на 20% за счёт поглощения молекулами кислорода, азота, углекислого газа, воды и озона и ещё на 40% за счёт пыли и дыма (рис. 38). В утренние и вечерние часы путь прохождения лучей в атмосфере очень сильно увеличивается, что приводит к ещё большему ослаблению интенсивности солнечного излучения на уровне моря. Таким образом, в полдень характерный уровень интенсивности солнечного излучения может достигать 1 кВт/м^2 в горах и тропиках и $0,5 \text{ кВт/м}^2$ в средней полосе России. Эта величина относится к плоскости, ориентированной строго на Солнце, и не зависит от времени года. С учётом наклона Солнца над горизонтом на садовый участок площадью 6 соток даже зимой в солнечный день поступает до 100 кВт солнечной энергии в полдень. Эта пиковая полуденная величина летом ещё более возрастает до 150 кВт и является основой жизни.

Тепловое воздействие прямого солнечного излучения отчётливо ощущается человеком и может привести к тепловому (солнечному) удару уже при температурах $25\text{--}30^\circ\text{C}$. Это свидетельствует о том, что тепловые потоки $0,5\text{--}1 \text{ кВт/м}^2$ и в бане могут оказать определяющее влияние на тепловой режим человеческого организма. Человек одинаково воспринимает воздействие теплового излучения при сухой и мокрой коже. Что касается нагрева «неживых» материалов, то солнечное излучение способно раскалить, например, песок на пляже или в пустыне до температур порядка 100°C . Действительно, подъём температуры доски на солнце продолжается до тех пор, пока теплоотвод от поверхности доски за счёт собственного излучения доски и кондуктивного охлаждения (см. рис. 40) не сравняется с мощностью падающего солнечного излучения порядка 1 кВт/м^2 , что и происходит при температурах порядка 100°C . С другой стороны, температура потолка в бане на уровне 100°C обеспечивает мощность инфракрасного излучения на уровне обычных в России мощностей солнечного излучения.

Инфракрасное излучение практически не поглощается воздухом в слоях 2–10 м, характерных для бань, и не разогревает его, распространяется

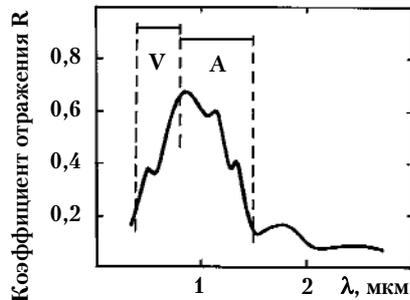


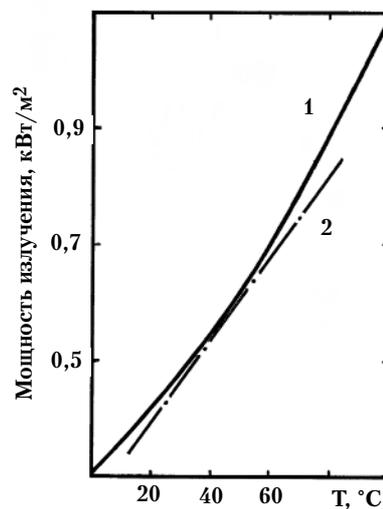
Рис. 41. Спектральная зависимость коэффициента отражения оптического излучения кожей человека. V – спектральный интервал видимого излучения, A – спектральный интервал A-диапазона инфракрасного излучения.

прямолинейно и поступает из излучателя непосредственно на стены, пол, потолок, разогревая их. «Управлять» мощностью инфракрасного излучения можно только регулируя температуру излучателя, а также устанавливая на пути излучения различного рода экраны. Такими экранами окружают, например, раскалённые металлические стенки топливников печей (в виде кожухов-калориферов), загораживают особо холодные стены портьерами, ширмами и т. п.

Инфракрасное излучение исходит и от тела человека, охлаждая его. Поскольку инфракрасное излучение при температурах ниже 100°C является длинноволновым ($\lambda > 3$ мкм), для которого степень черноты кожи человека (а также древесины) близка к единице $\epsilon = 1 - R \approx 1$ (где R – коэффициент отражения, приведённый на рис. 41), то мощность излучения тела человека (и древесины) близка к мощности излучения абсолютно чёрного тела (рис. 42). Все рассуждения предыдущих разделов относились к случаю отсутствия инфракрасного нагрева или охлаждения тела человека, то есть предполагалось, что стены бани (или иного помещения) имеют температуру человеческого тела порядка 40°C . Но если стены бани имеют температуру большую или меньшую, чем температура тела человека, то тело человека дополнительно нагревается или охлаждается.

При слабых (до 20°C) бытовых отклонениях температур стен от температуры человека $\Delta T < 20^{\circ}\text{C}$ тело отдаёт или получает лучистое тепло

Рис. 42. Мощность инфракрасного излучения (интегральная по всему спектру) с 1 м^2 абсолютно чёрного тела во все стороны (в полупространство) при температурах от 0 до 100°C : 1 – рассчитанная по формуле $\sigma(273+T)^4$, 2 – экстраполяционная прямая $0,54+0,007(T-40)$, где T в $^{\circ}\text{C}$.



в количестве $q_{\text{луч}} = \alpha_{\text{л}} \Delta T$, где $\alpha_{\text{л}} = 7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ град})$ – коэффициент бытовой лучистой теплопередачи (рис. 42). При температурах $60\text{--}120^\circ\text{C}$ коэффициент лучистой теплопередачи возрастает до $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ град})$. При температуре стен помещения порядка 0°C раздетый человек даже с сухой кожей отчётливо ощущает «леденящий холод стен» даже при температурах воздуха 40°C и максимальной влажности воздуха, поскольку теряет за счёт собственного инфракрасного излучения $0,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$, а получает за счёт поглощения инфракрасного излучения, исходящего от холодных стен, всего $0,3 \text{ Вт}/\text{м}^2$. В результате суммарный баланс отрицателен и очень велик $0,2 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Для компенсации столь высоких теплопотерь необходимо поднять температуру воздуха в помещении на $20\text{--}30^\circ\text{C}$, то есть до $60\text{--}70^\circ\text{C}$. Если же температуры стен и потолка составляют 100°C , то суммарный тепловой баланс (по лучистому теплу) раздетого человека с сухой кожей будет положительным $0,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$, и воздух можно охладить до минус 10°C .

В обыденной жизни человек отчётливо ощущает изменения лучистых потоков при изменениях температуры стен всего в несколько градусов (при постоянстве температуры воздуха). Так, строительные нормы и правила СНиП 41-01-2003 рекомендуют не использовать на постоянных рабочих местах в промышленных производствах потоки лучистого тепла более $35 \text{ Вт}/\text{м}^2$, что соответствует наличию излучающих поверхностей с температурой на 5°C выше температуры человека. А при величинах лучистого потока более $140 \text{ Вт}/\text{м}^2$ необходимо применять воздушное душирование (обдув открытых частей тела человека воздухом). Если человека окружают излучающие поверхности с разной температурой, то необходимо соответствующим образом суммировать и усреднить мощности излучений, достигающих тела человека, с разных поверхностей. В связи с этим отметим, что упомянутые выше экраны могут значительно изменить картину лучистых потоков, «забирая» тепловую энергию из воздуха и преобразуя её в лучистое тепло, или, наоборот, поглощая потоки лучистой энергии и преобразовывая её в тепловую энергию воздуха. Например, застеклённый оконный проём в морозную погоду представляет собой холодный элемент помещения, «забирающий» лучистую энергию (а точнее, слабо излучающий тепло элемент и слабо отражающий падающее на него излучение). Но если загородить окно экраном (например, в виде матерчатой шторы), то экран приобретает температуру, близкую к комнатной, и будет излучать обратно в помещение значительно больше лучистой энергии. Этот эффект издавна применялся в жилищном строительстве, например, при обшивке тканью (гобеленами) каменных стен замков в Западной Европе Средневековья, при отгораживании шторами спальных мест и т. п. При этом практически не важна плотность или теплопроводность тканей, значительно большее влияние имеет количество экранов

(слоёв экранирования). Также ясно, что в пасмурную ночь теплее, чем в ясную звёздную, поскольку со всех предметов на Земле тепловое излучение в ясную погоду (даже днём) безвозвратно «улетает» в космос (имеющий температуру минус 273°C), а облака частично компенсируют эти теплопотери собственным излучением с температурой капель воды в облаке, например, 0°C . Напомним также, что атмосфера имеет «окна» оптической прозрачности 3,4–4,2 мкм и 8–12 мкм. Эти «окна» ограничены с обеих сторон спектральными полосами поглощения молекул воды и углекислого газа. Поэтому при высокой влажности воздуха атмосфера «закрывает» эти «окна» прозрачности, и излучение уже не может «улетать в космос» (парниковый эффект).

В заключение рассмотрим вопрос физического взаимодействия инфракрасного излучения с телом человека. При падении светового потока на кожу часть лучистой энергии отражается, а другая часть проникает внутрь тканей, ослабляясь по мере углубления за счёт поглощения компонентами биологической ткани. Спектральная зависимость коэффициента отражения представлена на рис. 41, откуда видно, что кожа отражает только видимый и ближний инфракрасный (ИК) свет (так называемый А-диапазон ИК-излучения 0,75–1,5 мкм). В этом легко убедиться, посветив в темноте фонариком на ладонь и наблюдая отражённый свет на белом экране (стене). Инфракрасное же излучение с длиной волны более 1,5 мкм практически не отражается и поглощается тканями с эффектом обычного нагрева.

Теперь прислоним рефлектор фонарика к ладони (или загородимся ладонью от света электрической лампочки). Мы увидим, что промежутки между сомкнутыми пальцами красные. Это значит, что биологические ткани пропускают (частично) красный цвет (рис. 43). То есть красный цвет глубоко проникает под кожу. Действительно, если посветить фонариком в закрытые глаза, то отчётливо почувствуем свет, проникающий через ткань век и воспринимаемый как «свет, который мешает уснуть». Экспериментальные измерения показывают, что коэффициент поглощения тканей минимален в видимой красной и ближней (коротковолновой) инфракрасной области (в А-диапазоне ИК-излучения). Таким образом, излучение с длинами волн 0,75–1,5 мкм хорошо отражается от кожи, но в то же время неотразившаяся часть излучения глубоко проникает в ткань. Считается, что глубоко проникающее излучение обеспечивает прогрев тканей, причём мягкий и безболезненный прогрев, поскольку поглощение тепла «размыто» по большому объёму подкожной ткани и по большому количеству терморцепторов. Этому способствует и очень высокое рассеивание красного и инфракрасного излучения в тканях человека. Так, просвечивая мощным источником света ладонь, вы не сможете



увидеть костей на фоне общего красного свечения. Поэтому источники света с большой долей ближнего инфракрасного излучения (Солнце, юпитеры, софиты, лампы накаливания, в том числе широко известные синие лампы-рефлекторы Минина и красные с поляризованным светом типа Биотрон) используются в физиотерапии как лечебное средство. В действительности же на значительные глубины 1–4 см проникают лишь доли процента излучения, поэтому даже когерентный красный свет в гелий-неоновой лазеротерапии поглощается преимущественно кожей, которая может воспринимать поглощенное излучение как ожог. В то же время, охлаждая кожу (водой, стеклом) и облучая её мощным ИК-излучением А-диапазона можно добиться очень интересных эффектов. Например, если облучать ванну мощным ИК-излучением А-диапазона, то можно с комфортом находиться даже в ледяной воде не замерзая. Или можно приложить к коже оптически прозрачную пластинку стекла и облучить через неё кожу импульсом очень мощного ИК-излучения А-диапазона (сотни кВт/м²). Тогда верхний слой кожи, в котором находятся высокочувствительные терморцепторы, не успевает нагреваться из-за контакта со стеклом и не чувствует боли от ожога, но тем не менее глубинные области кожи, где располагаются луковицы волос, на мгновение прогреваются до температур порядка 70°C. Это оказывается достаточным, чтобы погибли зародыши волос, что приводит к эффективной и безболезненной эпиляции, используемой в косметологии.

Выделить инфракрасное излучение А-диапазона из общего потока инфракрасного излучения легко, достаточно поместить между источником и человеком лист самого обыкновенного оконного стекла. Стекло поглощает излучение В и С-диапазонов, но пропускает излучение А-диапазона. Так, если источником инфракрасного излучения является металлическая печь или камфорка электроплиты, то лист стекла, помещённый между источником излучения и человеком, полностью поглотит поток лучистого тепла и не пропустит его на лицо или ладонь, поскольку нагретые до 400–1000°C поверхности излучают только инфракрасные лучи С-диапазона. Но если источником инфракрасного излучения является лампа накаливания (например, лампа Минина с рефлектором), а тем более Солнце, то лист стекла практически не ослабит поток лучистого тепла, поскольку нагретые до 2000–6000°C поверхности излучают преимущественно инфракрасные лучи А-диапазона. Аналогичными оптическими свойствами обладают многие прозрачные пластические массы и жидкости, в частности вода, являющаяся основным компонентом мягких тканей организма человека (рис. 43). Проверить это так же легко: надо между ладонью и печью пролить воду (плоской струёй или душем) и почувствовать разницу. А так как кожа наполовину состоит из воды, то кожа тоже поглотит

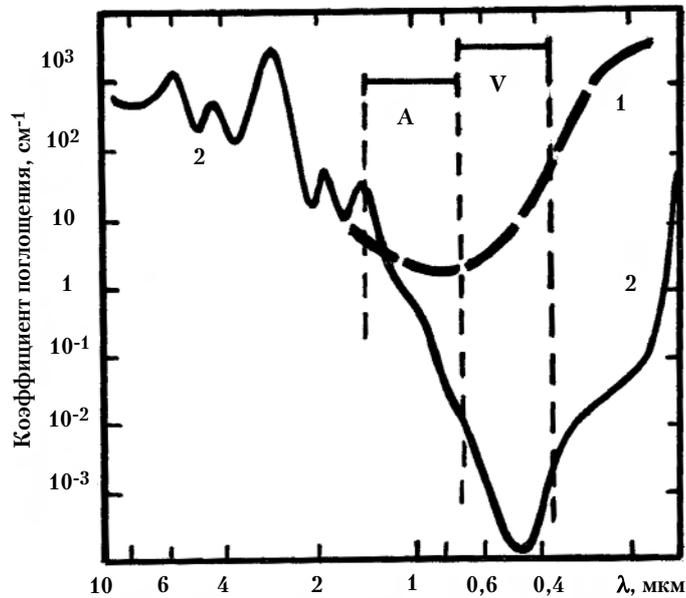


Рис. 43. Коэффициент поглощения k , определяющий ослабление интенсивности луча света $I=I_0 \cdot \exp(-kx)$, где I_0 – интенсивность света, падающего на слой вещества толщиной x , I – интенсивность света прошедшего слой вещества толщиной x . 1 – спектральная зависимость коэффициента поглощения света мягкими тканями организма человека, 2 – спектральная зависимость коэффициента поглощения света водой, V – спектральный интервал видимого излучения, A – спектральный интервал A-диапазона инфракрасного излучения (см. В.И. Карандашов и др., Фототерапия, М.: Медицина, 2001 г.).

ИК-излучение С-диапазона. Аналогично, вода (пот) на теле человека поглощает излучение с $\lambda > 1,5$ мкм от печи, но практически не ослабляет инфракрасное излучение от Солнца или электрической лампочки. Можно использовать и отражательные свойства материалов. Если мощной лампой накаливания (или Солнцем) осветить древесину (лучше колотую или строганую), натуральную поделочную кожу (крупного рогатого скота) или даже кожу человека (см. рис. 41), то отразится преимущественно именно ближний инфракрасный свет А-диапазона. Аналогичного эффекта можно достичь при отражении на стёклах, в том числе с отражающим слоем (зеркала). Так фильтры ИКС-1 и ИКС-7 пропускают излучение с длинами волн 0,8–3 мкм, кварц – 0,2–6 мкм, флюорит CaF_2 до 10 мкм.



Японские производители инфракрасных саун (ИК-кабин) в целях рекламы беспочвенно утверждают, что длинноволновое ИК-излучение С-диапазона с длиной волны порядка 10 мкм, испускаемое кожей человека, якобы обладает способностью глубоко проникать в ткани организма человека в силу каких-то особых «резонансных свойств», присущих «живому» излучению. Эти особые свойства обуславливают якобы «полезный» эффект чудотворного глубокого прогрева тканей методом «возложения рук» колдунами-целителями при приближении ладоней без касания к телу. Кроме того, такое излучение якобы жизненно необходимо человеку, так как именно им он согревается с момента зачатия в утробе матери. Поэтому такое длинноволновое излучение в рекламе ИК-саун названо «лучами жизни». Безусловно, все эти красивые утверждения являются крайне удачной находкой рекламы, но не имеют ничего общего с фундаментальной истиной. Каждый вправе верить или не верить в колдовские возможности «лучей жизни», чудотворных «возложений рук» и «объятий» ИК-саун. Но отметим, что в ИК-кабинах речь идёт о самом обычном нагреве, таком же, как от обычных печей. Кроме того, согласно физическому закону Кирхгофа, если какая-либо (любая) поверхность сильно излучает в каком-либо спектральном диапазоне, то она и сильно поглощает в этом диапазоне (и плохо отражает). Поэтому если понимать «резонанс» в обычном смысле как пик поглощения, то кожа ребёнка как раз и не даёт «лучам жизни» пройти через себя вглубь тела. Более того температуры трубчатых (в том числе керамических) электронагревателей – инфракрасных излучателей японских ИК-саун – вовсе не равны температуре человеческого тела и достигают 500°С, что полностью перечёркивает все рекламные «доводы» производителей. Если бы были справедливы утверждения рекламы о «лучах жизни», то более полезными были бы обычные бани с температурой стен и потолка 40–100°С, особенно турецкие хаммамы. К сожалению, доказательств высокой прозрачности тела человека в длинноволновой области спектра нет (см. рис. 43).

Вслед за японскими фирмами выпуск ИК-саун (как новой престижной продукции) наладили фирмы США, Германии, Финляндии, Нидерландов и России, и, что характерно, с излучателями самых разных температур (и соответственно, совсем разных спектральных составов), причём каждая фирма утверждает, что её спектральный состав наиболее полезен для здоровья. Если отбросить псевдомедицинские доводы, то можно сообразить, что все эти ИК-кабины являются, по-существу, аналогами ИК-камер (сушилок) для полимеризационного отверждения («сушки») лакокрасочных автомобильных покрытий.

Малая мощность ИК-облучения, присущая всем этим кабинам, не превышает энергетический уровень привыкания 0,2 кВт/м². При та-



ких мощностях облучения всё равно, нагревается ли только кожа или вся подкожная ткань (см. раздел 5.3). Так что в ИК-саунах речь идёт о самом обычном нагреве, иногда, может быть, и полезном (как и любой иной нагрев, например, обогрев у батареи центрального отопления).

Вместе с тем отметим, что некоторые нагретые керамические материалы на самом деле имеют спектр излучения, отличный от спектра излучения абсолютно чёрного тела. Так, известные штифты Нернста с температурой более 2000°C дают белое излучение с весьма резкими максимумами в области длин волн 2 и 6 мкм, что определяется спектральной зависимостью черноты керамики. Биологических особенностей воздействия штифтов Нернста на человека не отмечалось.

4.7. Тепловое воздействие метеопараметров

Таким образом, человек в бане находится под воздействием очень большого количества внешних факторов. Если в ванне всё тело человека погружено в однородную теплоёмкую и высокотеплопроводную массу воды и термостатировано «от головы до ног», то в бане тело человека находится в воздухе со сложным пространственным и временным распределением скоростей потоков, температур и влажностей, в окружении различных излучающих поверхностей (стенок печей, полов, окон, стен) с различными температурами и степенями черноты, в контакте с водой различной температуры, полами и полками с различной температурой и различных материалов и т. п. В этом плане баня много сложнее и «богаче» ванн и душей по ассортименту воздействий, вследствие чего человеку порой приходится «крепко думать головой» как добиться в реальной бане желаемого комфорта или желательного лечебного последствия. Но тем баня и интересней ванн – живей, разнообразней, многогранней и увлекательней. Вместе с тем, людям, равнодушным к банному творчеству, баня готова предложить пусть более скучные, но зато надёжные и предсказуемые изотермальные условия, имитирующие тёплую ванну, но сохраняющие достоинства бань в части удобства мытья, лёгкости перемещения тела, возможности нанесения на кожу лечебных и косметических препаратов и т. п.

В предыдущем разделе на основе самых общих житейских представлений о воздействии солнечного излучения мы чисто гипотетически предположили, что мощность нагрева тела на уровне 0,5–1,0 кВт/м² уже, видимо, заведомо достаточна для создания банных условий. Именно этот интервал мощностей ИК-излучения А-диапазона используется и в физиотерапии: до 0,4 кВт/м² для аппарата «Биотрон» и до 1 кВт/м² для гелий-неоновой

лазерной терапии. Для ориентировки приведём данные по энергозатратам человека по ГОСТ 12.1.005-75 и СНиП II-90-81:

Категория тяжести выполняемых работ	Энергозатраты Вт	Потребление кислорода г/час	Выделение углекислого газа г/час
Состояние покоя	до 88	до 28	до 23
Лёгкие работы	88–172	28–56	23–45
Работы средней тяжести	172–293	56–112	45–100
Тяжёлые работы	более 293	112–150	100–135

Поскольку тепловыделение внутри организма составляет не менее 75–90% от энергозатрат (и только 10–25% энергозатрат преобразуется в полезную работу), то человеку становится жарко от тяжёлой физической работы при тепловыделении порядка 0,2–0,3 кВт/м² (площадь поверхности человека условно принята на уровне 1 м²). Характерные механизмы теплоотдачи одетого человека, ведущего обычную деятельность, приведены на рис. 44.

Таким образом, можно предположить, что тепловые потоки на тело ниже 0,1–0,2 кВт/м² человек ощущает как незначительные, влияющие на ощущения человека лишь при длительных экспозициях, например, на рабочих местах на производствах, в турецких банях или ИК-кабинах. Тепловые потоки выше 1 кВт/м² человек ощущает как значительные (тогда ощущаемые). Напомним, что в официальной медицинской фототерапии потоки тепла подразделяются на мягкие 1–20 Вт/м², средние 20–300 Вт/м² и жёсткие 300–5000 Вт/м².

Нагрев (или охлаждение) тела человека (или отдельных его частей) происходит за счёт следующих механизмов:

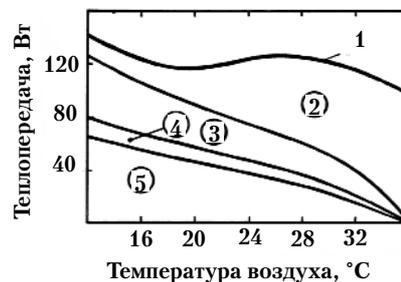
- лучистой теплопередачи,
- кондуктивной теплопередачи (теплопроводности),
- конвективной теплопередачи,
- испарения влаги с поверхности тела или конденсации паров воды на поверхность тела из воздуха.

Лучистая теплопередача и её особенности уже рассмотрены в предыдущем разделе (рис. 42). Выполним аналогичный анализ и для других процессов теплопередачи.

Кондуктивная теплопередача обусловлена движением молекул и может наблюдаться и в подвижном (даже навстречу газовому потоку), и в абсолютно неподвижном воздухе в случае наличия зон воздуха с различной температурой. В горячих зонах молекулы более энергичны (име-

ют бóльшую скорость), чем в холодных зонах. Поэтому в процессе взаимной диффузии (миграции) молекулы из горячих зон приносят добавочное тепло, а молекулы, прибывшие в горячие зоны из холодных, приносят холод. Величина кондуктивного теплового потока равна $q_{\text{конд}} = \lambda \Delta T / \sigma$, где λ – коэффициент теплопроводности среды, ΔT – перепад температуры на слое среды толщиной σ . Величина $\Delta T / \sigma$ называется градиентом температуры в среде. Величина $\alpha_k = \lambda / \sigma$ называется коэффициентом кондуктивной передачи. Для оценочных расчётов можно принять $\alpha_k = 10$ Вт/(м² град) для любых поверхностей (для раздетого ли человека, нагретых или охлаждённых стен, батарей отопления и других условно плоских поверхностей в неподвижном воздухе). Так, например, человек, выделяющий внутри себя в состоянии покоя 60 Вт тепла постоянно, сбрасывает это тепло излучением $\alpha_l(T_k - T)$, где $\alpha_l = 7$ Вт/(м² град) – коэффициент бытовой лучистой теплопередачи, и теплопроводностью воздуха $\alpha_k(T_k - T)$, где $\alpha_k = 10$ Вт/(м² град), вследствие чего раздетый человек с температурой кожи $T_k = 30^\circ\text{C}$ не мёрзнет в состоянии покоя при температуре воздуха и стен 26°C . Действительно, в соответствии с исследованиями Кричагина (1966 г.) термический комфорт раздетого лежащего человека достигается при $25\text{--}27^\circ\text{C}$. Но если человек находится на ярком солнце, например, в высокогорных Альпах, где уровень солнечного излучения достигает $1,05$ кВт/м² (причём за счёт отражения от снега излучение исходит со всех сторон), то раздетый человек с сухой кожей в окружении деревьев не мёрзнет в абсолютно полный штиль даже при температуре воздуха снега и деревьев на уровне минус 30°C . Но малейшие дуновения воздуха изменяют всю картину, поскольку добавляется теплоотвод за счёт конвекции (движения) воздуха. При скорости ветра 3 м/сек человек с сухой кожей на солнце в условиях высокогорья мёрзнет уже при 0°C . Если вокруг деревьев нет, то заметным становится и вклад потери излучения в ясное небо (космос). Ещё серьёзней будут последствия увлажнения кожи раздетого человека.

Рис. 44. Характерные уровни теплопередачи одетого человека с сухой кожей при различных температурах воздуха. 1 – тепловыделение человека (обычная теплоотдача), 2 – вклад теплоотдачи испарением, 3 – вклад теплоотдачи конвекцией, 4 – вклад теплоотдачи теплопроводностью, 5 – вклад теплоотдачи излучением.

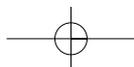




Конвективная теплопередача наблюдается только при движении воздуха. Если в случае кондуктивной теплопередачи каждая энергичная молекула с трудом мигрирует среди других молекул воздуха из горячей зоны в холодную, то в случае конвективной теплопередачи все энергичные молекулы могут разом «сдуться» ветром в составе всей массы воздуха из горячей зоны в холодную. Конвективный теплоток равен $q_{\text{конв}}(\text{кВт}/\text{м}^2) = C_p \rho V(T_1 - T_2) = 1,3V(T_1 - T_2)$, где C_p и ρ – массовая теплоёмкость и плотность воздуха, V – скорость перемещения воздуха (ветра) в м/сек, T_1 и T_2 – температуры горячей и холодной зон в °С. Именно эта конвективная теплопередача имелась в виду в разделе 5.5 при рассмотрении аэродинамики бани. Так, металлическая печь нагревает вокруг себя воздух до температуры T_1 , этот горячий воздух постоянно «сдувается» потоком ветра (конвективным потоком) и заменяется на холодный воздух с температурой T_2 , который в свою очередь начинает нагреваться от стенки печи. При этом воздух, контактирующий с горячей поверхностью, вовсе не обязан успеть нагреться до температуры поверхности. Нагревается до температуры поверхности лишь тонкий пристеночный слой, причём скорость его скольжения вдоль поверхности может быть много меньше, чем скорость всего набегающего газового потока.

Если горячий воздушный поток поступает, например, сверху вниз с потолка на холодный пол (или на тело человека), то лишь небольшая (по экспериментальным оценкам примерно одна двухсотая) доля тепловой энергии горячего воздуха отдаётся самому полу. Это объясняется той банальной причиной, что не весь горячий воздух из набегающего потока может вступить в контакт с холодным полом, а лишь очень небольшая его доля. Если поток воздуха ламинарный (то есть не имеет завихрений – турбулентностей), то теплоотдача от поверхности в набегающий поток воздуха в теории бассейнов численно равна $q_{\text{конв}}(\text{кВт}/\text{м}^2) = 0,006V\Delta T$, где V – скорость движения воздуха в м/сек, ΔT – разница температур воздуха и поверхности. Для ориентировки приведём характеристики силы ветра по шкале Бофорта (Сборник «Путеводитель по цифрам и фактам», М.: Рипол-Классик, 2002):

Балл Бо-форта	Сила ветра	Скорость, м/сек	Напор ветра, Па	Эффект
0	Штиль	0–0,2	0,03	Дым поднимается строго вверх
1	Тихий	0,3–1,5	1,5	Дым слегка отклоняется
2	Лёгкий	1,6–3,3	7,0	Ощущается лицом
3	Слабый	3,4–5,4	19	Кольшутся листья деревьев

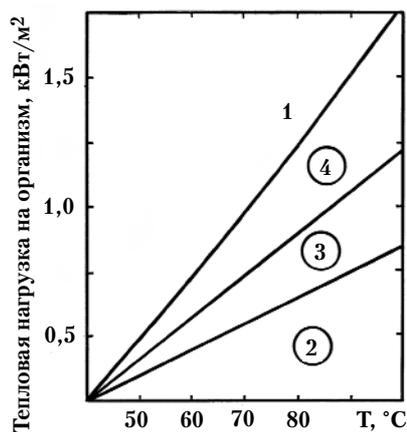


4	Умеренный	5,5–7,9	40	Колеблются ветки деревьев
5	Свежий	8,0–10,7	74	Раскачиваются небольшие деревья
6	Сильный	10,8–13,8	123	Раскачиваются большие деревья
7	Крепкий	13,9–17,1	190	Ломаются ветви
8	Очень крепкий	17,2–20,7	278	Ломаются толстые ветви
9	Шторм	20,8–24,4	387	Ломаются деревья
10	Шторм сильный	24,5–28,4	524	Деревья вырываются с корнем
11	Жёсткий шторм	28,5–32,6	690	Разрушения
12	Ураган	более 32,7	более 700	Опустошения

Ясно, что очень большие скорости ветра в бане могут быть реализованы, может быть, лишь в молодёжных банных аттракционах будущего. В реальных банях скорости воздуха не превышают 5–7 м/сек при использовании вентиляторов и 1–3 м/сек при использовании веников. В носоглотке скорость движения воздуха при вдохе составляет 2–10 м/сек. Под напором ветра понимается избыточное статическое давление, образующееся при торможении ветра перед преградой и равное $\rho V^2/2$, где V – скорость ветра. Напомним, что 1 атм = 100000 Па = 750 мм рт. ст.

На рис. 45 представлены тепловые потоки на тело человека в хомотермальных условиях (или в режимах ниже хомотермальной кривой при сухой коже), когда процессы испарения и конденсации невозможны. Все три слагаемых суммарного теплового потока (кондуктивная, конвективная и лучистая составляющие) возрастают с температурой бани и при 100°C составляют примерно по 0,5 кВт/м², а в сумме 1,5 кВт/м². Такие тепловые

Рис. 45. Тепловой поток на тело человека (безразлично с мокрой или сухой кожей) в изотермической бане с температурой T и скоростью движения воздуха 1 м/сек в хомотермальном режиме (кривая 1). Зона 2 отвечает вкладу кондуктивной составляющей теплового потока. Зона 3 – вклад конвективной составляющей при скорости движения воздуха 1 м/сек. Зона 4 – вклад лучистой составляющей, равной разнице потоков излучения от стен и от тела человека $[\sigma(T+273)^4 - \sigma(40+273)^4]$.



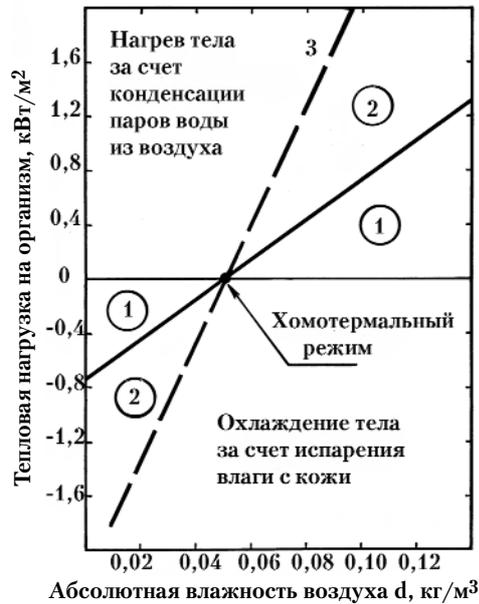


Рис. 46. Тепловой поток на тело человека (при произвольной температуре), обусловленный испарением влаги с мокрой кожи человека (поток отрицательный, поскольку тело человека при этом охлаждается) или конденсацией паров воды из воздуха на мокрую или сухую кожу человека (поток положительный). Зона 1 – вклад охлаждения (нагрева) за счёт испарения (конденсации) в неподвижном воздухе (кондуктивная составляющая). Зона 2 – вклад охлаждения (нагрева) за счёт испарения (конденсации) в подвижном воздухе (конвективная составляющая для скорости движения воздуха 1 м/сек). Кривая 3 – суммарный тепловой поток (сумма кондуктивной и конвективной составляющих при скорости воздуха $V=1$ м/сек).

нагрузки превышают энерговыделения от тяжёлой физической работы и находятся на уровне воздействия солнечного излучения. Это означает, что могут быть реализованы жаркие климатические условия, но ни о каких обжигающих эффектах в этих режимах говорить не приходится.

Вклад конвективной составляющей на рис. 45 рассчитан для условного уровня скоростей перемещения воздуха 1 м/сек, характерных для лёгких движений веника и перемещений человека в бане. При отсутствии воздушных потоков конвективная составляющая равна нулю. При больших скоростях потоков воздуха, например, в носоглотке, конвективная составляющая может стать преобладающей.

Вклад лучистой составляющей на рисунке 45 рассчитан для изотермической бани, в которой все стены, потолок и пол имеют температуру, равную температуре воздуха, и только человек имеет температуру отличную от температуры воздуха. Поэтому, приведённые значения вклада лучистой составляющей являются максимально возможными. В реальных условиях пол и стены холодней, чем потолок, поэтому на практике вклад лучистой составляющей является менее значительным.

Теплопередача, связанная с процессами испарения воды и конденсации водяных паров, может происходить кондуктивно (в неподвижном воздухе) и конвективно (при движении воздуха) и в случае теплопередачи на тело человека равна:



$q_{\text{исп}}(\text{кВт}/\text{м}^2) = q_{\text{исп.конд.}} + q_{\text{исп.конв.}} = 15(d-0,05) + 28(d-0,05)V$, где d – абсолютная влажность воздуха в $\text{кг}/\text{м}^3$, V – скорость движения воздуха в $\text{м}/\text{сек}$. Как и в случае конвективной теплопередачи, конвективная составляющая теплового потока, связанного с испарением или конденсацией, значительно меньше (но не в двести, а восемьдесят раз) той величины $2250(d-0,05)V$, которая была бы в случае, если бы весь воздух в потоке мог попасть в контакт с телом человека.

Если в неподвижном воздухе теплопередача за счёт испарения или конденсации не превышает $(0,5-1)$ $\text{кВт}/\text{м}^2$, то появление воздушных потоков даже с умеренными скоростями до 1 $\text{м}/\text{сек}$, характерными для перемещения банного веника, позволяет получать тепловые потоки до 2 $\text{кВт}/\text{м}^2$ и выше (рис. 46). Это означает, что открывается возможность мгновенно кардинально изменять всю тепловую обстановку в бане. Именно эти эффекты положены в основу русских паровых бань, в которых весьма мягкие климатические условия дополняются кратковременными дозированными волнами нестерпимого жара, вызванных движением веника. В сухом же воздухе движения веника, наоборот, приводят к охлаждению мокрой кожи, причём можно добиться столь высоких мощностей охлаждения (более 1 $\text{кВт}/\text{м}^2$), что даже в высокотемпературной бане (с температурой порядка 100°C и выше) можно достичь ощущения холода. Это может быть положено в основу контрастных банных аттракционов.

Таким образом, процессы испарения-конденсации помогают чётко определить климатический тип бани. Для этого достаточно смочить лицо водой и махнуть на него веником (ладонью). Если вы почувствуете волну жара, то вы находитесь в паровой бане. Если вы почувствуете холод, то это сухая баня. Если ваши ощущения не вполне определены (не чувствуете ни холода, ни жары), то это влажная баня. Впрочем, у человека есть ещё одна возможность мгновенного определения климатического типа бани. Надо глубоко вдохнуть воздух. Если при вдохе носоглотка (всегда находящаяся во влажном состоянии) охлаждается, то это сухая баня. Если в носоглотке чувствуется влажное тепло, то это паровая баня. Если носоглотка чувствует «духоту» (ни тепла, ни холода), то это влажная баня. Кстати, именно из-за того, что в сухих банях влага в носоглотке испаряется, происходит не только охлаждение носоглотки, но и её пересыхание. С таким явлением знакомы все водители автомобилей, пользующиеся зимой автомобильными «печками» (калориферными нагревателями потока заборного воздуха с низкой абсолютной влажностью).

Всё это означает, что при 100°C может стать холодно, а при 40°C – жарко. Поэтому необходимо учитывать влияние всех без исключения метеорологических параметров. В то же время ясно, что сами по себе метеоро-