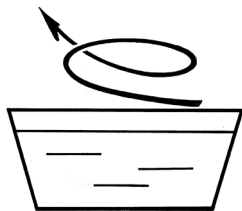


(с 6000 градусосутками отопительного сезона) достигло 3,5 м²/Вт (то есть утроилось). Нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции составляет при этом не более 4 °С, что снимает проблемы намокания стен.

Вместе с тем, необходимо сознавать, что мокрые стены вовсе не означают, что воздух в помещении тоже «мокрый» (влажный). Действительно, холодные мокрые от росы пластины кондиционера вовсе не указывают на то, что воздух «мокрый». Наоборот, это указывает на то, что кондиционер забрал влагу из воздуха и осушил его. Так и мокрые стены помещения означают, что воздух осушился за счёт холодных стен. Влажностный режим помещений в холодный период года классифицируется следующим образом: суховоздушный режим соответствует относительной влажности воздуха ниже 50%, нормальный – (50–60) %, влажный – (60–75) %, мокрый – свыше 75% (СНиП 23-02-2003). Это значит, что при температуре воздуха 20 °С в помещении, полностью лишенном общеобменной вентиляции, мокрый воздух может существовать при температурах стен (15,4–20)°С, влажный – при (12,0–15,4)°С, нормальный – при (9,2–12,0)°С, а сухой – при температурах стен ниже 9,2°С. Иными словами, низкие температуры стен неветилируемого помещения вызывают конденсацию паров и намокание стен, но зато обеспечивают сухость воздуха. Поэтому в многолюдной палатке с печкой зимой стены всегда мокрые (или даже мёрзлые), но зато воздух сухой. А в тёплом доме стены теплые и сухие, но воздух может стать влажным и даже мокрым, а мокрый (сырой) воздух при высоких температурах воспринимается человеком как душный, а при пониженных – как промозглый и даже затхлый.

Но есть такой тип сухих тёплых стен, при которых не может быть душно даже в отсутствии вентиляции. Это гигроскопические стены, в частности, деревянные. Они способны сорбировать (поглощать) пары воды из воздуха и в случае своей массивности (точнее, высокой потенциальной влагоёмкости) могут держать относительную влажность воздуха на фиксированном уровне (в зависимости от собственной влажности и температуры). Именно такие стены называются «дышащими» в деревенском и дачном быту, именно они важны в белых банях. Но если такие «дышащие» гигроскопические стены намокнут до уровня (25–30) % относительной влажности древесины, то они перестают «дышать» в дачно-деревенском смысле, поскольку сверхмелкие капилляры оказываются заполненными водой и древесина превращается в обычный впитывающий материал. Ни глазами, ни касаниями рукой невозможно отличить древесину 4%-ной влажности от 12%-ной влажности, и только при влажности 20–30 % древесина начинает ощущаться влажной.



Чем чаще вы хвалите строителей,
тем больше потом вы им заплатите.

4. Вентиляционный модуль

Вентиляционные системы подразделяются на общеобменные, обеспечивающие комфортные условия пребывания человека в бане, и на консервирующие, обеспечивающие необходимую просушку бани после окончания её работы. Эти виды вентиляции могут создаваться и работать раздельно на разных принципах, но могут и совмещаться или дополняться друг друга.

4.1. Общеобменная вентиляция

Общеобменная вентиляция осуществляет приток в баню свежего воздуха и удаление из помещения выделений вредных веществ, явных избытков тепла и влаги, а также устранение запахов и задымлённости. Несмотря на кажущуюся ясность и чёткость задачи, правильно понять её зачастую удаётся весьма формально. Действительно, в каждую точку свежий воздух не подашь и из каждой точки воздух не удалишь, тем более не установишь повсюду термометры, гигрометры и газоанализаторы.

4.1.1. Организация воздухообмена

Смена воздуха в каждой точке помещения происходит за счёт упорядоченных потоков воздуха, которые можно условно разделить на циркуляционные (внутренние замкнутые) и вентиляционные (замыкающиеся вне здания). В одних зонах бани воздух циркулирует или вентилируется чрезмерно быстро, а в застойных зонах – чересчур медленно. Именно циркуляция является тем самым фактором, который приводит к перемешиванию воздуха, в результате чего нежелательные примеси неизбежно распространяются по всем зонам бани (правда, со снижением концентраций). Удаление же примесей происходит лишь за счёт вентиляции.

Поэтому профессиональные проектировщики вентсистем обычно руководствуются следующей концепцией воздухообмена. У мест выделения нежелательных факторов (вредных или пахучих газов, тепла, влаги,

дыма) устанавливаются местные отсосы воздуха так, чтобы максимально воспрепятствовать распространению нежелательных (вредных) факторов на весь объём помещения (здания). Местные отсосы воздуха обычно не включаются в понятие общеобменной вентиляции (хотя и учитываются при расчёте баланса расходов приточного и вытяжного воздуха) и считаются как бы неотъемлемой частью того технологического оборудования, которое эти вредные выделения и осуществляет. По крайней мере вентсистемы местных отсосов запрещается объединять с вентсистемами общего обмена воздуха хотя бы потому, что воздух местных отсосов зачастую требует особой очистки перед выбросом в атмосферу и, кроме того, может загрязнить системы общеобменной вентиляции. Задачей же общеобменной вентиляции является подача чистого воздуха в здание, причём не просто подача воздуха в помещения вообще, а именно в зону пребывания людей (в жилую или рабочую зону) или даже в зону дыхания к лицам людей. Задачей общеобменной вентиляции является также удаление воздуха из помещения, причём желательнее именно из тех зон, в которых воздух, по мнению проектировщиков, наиболее загрязнён и/или чрезвычайно увлажнён, и/или чересчур нагрет. Все вентиляционные системы могут дополняться системами кондиционирования воздуха (осушки или увлажнения, нагрева или охлаждения) и отопления помещений (в том числе воздушными, которые по существу представляют собой тёплый приток воздуха).

Конечно же, вентсистемы ванных комнат, душевых кабин и банных помещений не столь сложны как, скажем, вентсистемы химических заводов, но основные принципы организации воздухообмена везде одинаковы. Так, в чёрных банях основным вредным фактором является дым от очага. Поэтому ещё в древности люди догадались сделать местный отсос воздуха над очагом в виде дымового сборника (дымника), который впоследствии превратился в дымовую трубу и стал частью технологического оборудования, а именно печи. При этом задача общеобменной вентиляции в банях сузилась в основном до устранения духоты – излишней влажности воздуха, создаваемой горячей (особенно кипящей) водой, а также испарением пота и дыханием людей.

Такая же ситуация возникает и в помещениях крытых бассейнов – большая поверхность тёплой водной глади (с температурой порой более высокой, чем температура воздуха в помещении) неминуемо увлажняет воздух. Поскольку помещения бассейнов весьма прохладные (по сравнению с банями), духота в них проявляется слабо, но возникает другая проблема – начинается конденсация водяных паров на относительно холодных стенах и особенно окнах. Чтобы окна «не плакали», в помещениях крытых бассейнов в обязательном порядке устанавливают осушители воздуха или оборудуют

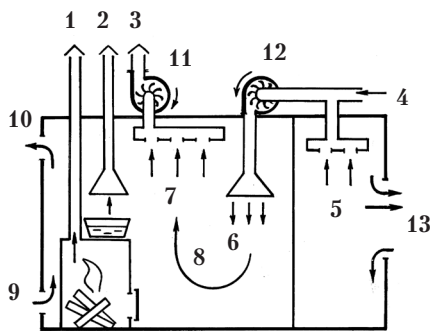


Рис. 41. Основные функциональные элементы систем воздухообмена. 1 – выбросы местного отсоса (локальная вытяжка) дымовых газов из печи (дымовая труба), 2 – выброс местного отсоса выделений вредного фактора (повышенной влажности над поверхностью горячей воды), 3 – выброс вытяжного воздуха механической общеобменной вентиляцией (разрешения на выбросы вредных веществ выдаются экологическими подразделениями Госкомприроды), 4 – приём свежего воздуха, 5 – вытяжные отверстия общеобменной системы

рециркуляции, 6 – приток свежего воздуха с подмешиванием рециркулирующего воздуха, 7 – вытяжные отверстия общеобменной вентиляции, 8 – воздушные вентиляционные потоки внутри помещения, 9 – приточное отверстие естественной вентиляции, 10 – вытяжное отверстие естественной вентиляции, 11 и 12 – вентагрегаты с электроприводом, 13 – окно с естественными приточными и вытяжными потоками воздуха.

дуют приточно-вытяжную вентиляцию с таким расчётом, чтобы точка росы воздуха в помещении бассейна была ниже температуры стен и окон. Конечно, самым разумным решением была бы установка над гладью бассейна местного отсоса (например, в виде вытяжного зонта) и подача свежего воздуха с улицы в зону оконных застеклений. Но в большинстве бытовых случаев всему воздуху в помещении дают сначала возможность беспрепятственно перемешаться с нежелательными примесями и лишь потом начинают удалять загрязнённый воздух с заменой его на свежий.

Общие принципы воздухообмена в соответствии со СНиП41-01-2003 иллюстрируются рисунком 41. Из мест выделения нежелательных летучих загрязнений организуются местные отсосы воздуха: из дровяной печи (очага) в виде дымовой трубы 1 и от глади горячей воды в баке (тазу, кастрюле) в виде вытяжного зонта 2. Местные отсосы могут быть с естественной тягой или с механической (принудительной, искусственной) вытяжкой (вентилятором).

Общеобменная вентиляция также может быть с естественным или с механическим (принудительным) побуждением (СНиП41-01-2003). Естественная вентиляция обеспечивается либо за счёт повышенной температуры воздуха в помещении (с приточным вентотверстием наверху 10 или с протяженным по высоте оконным приточно-вытяжным проёмом 13) или за счёт ветрового напора с произвольным расположением вентотверстий по высоте противоположных стен. Естественная вентиляция в быту называется проветриванием.

Механическая общеобменная вентиляция осуществляется электрическими вентагрегатами 11 и 12, которые могут быть специальными (пыле-

защитными, взрывозащищёнными, огнестойкими, противодымными, с очисткой нагревом, охлаждением, осушением или увлажнением подаваемого воздуха и т. п.). Общеобменный поток воздуха 8 должен проходить через зону пребывания людей, что обеспечивается достаточным удалением друг от друга и должным расположением приточных 6 и вытяжных 5 и 7 отверстий воздуховодов. Приточные и вытяжные отверстия могут быть локальными 6 (с тонкой дальнобойной воздушной струёй) или пространственно распределёнными 7 (с широкой ламинарной воздушной струёй). Совершенно понятно, что вытяжная вентиляция с механическим побуждением электровентиляторами в помещениях с печами возможна лишь при наличии полностью компенсирующего или даже преобладающего притока (причём обязательно тоже с механическим побуждением) во избежание засасывания дыма из печи в помещение. А вот приточную вентиляцию в отдельностоящих банях можно осуществить вентиляторами всегда.

В целях экономии тёплого (или, может быть, наоборот, охлаждённого или очищенного) воздуха иногда организуют рециркуляцию воздуха, то есть в приточный воздух, забранный из атмосферы через приёмное отверстие 4, подмешивают вытяжной воздух, отсасываемый из того же помещения или из другого 5. Рециркуляция применяется, в частности, при воздушном отоплении здания. Рециркуляция воздуха ограничивается пределами одной квартиры (дома), одного помещения в общественном здании, одного или нескольких помещений, в которых выделяются одинаковые вредные (или нежелательные) вещества. Ясно, что рециркуляция возможна лишь в том случае, когда вытяжной воздух, в общем-то, является чистым, и его можно вернуть в помещение. Рециркуляцией не является простое перемешивание воздуха в пределах одного помещения, в том числе сопровождаемое нагреванием (охлаждением) отопительными агрегатами (приборами) или вентиляторами (комнатными, потолочными) и кондиционерами (СНиП41-01-2003, приложение А). Таким образом, аэродинамическое понятие «циркуляция» (кружение воздуха за счёт нагрева от печи) в корне отличается от профессионального вентиляционного термина «рециркуляция». Кроме того, напомним, что воздушное душирование (обдув в целях охлаждения) людей, например, при чрезмерных лучистых потоках, также отличается по сути от циркуляции, рециркуляции, перемешивания и вентиляции.

4.1.2. Загрязняющие факторы и необходимая кратность воздухообмена

Человек устроен так, что выдыхает воздух именно туда, откуда тотчас его и вдыхает. Поэтому очень важна не столько вентиляция всего помещения и даже не вентиляция места пребывания людей, сколько подача

свежего воздуха именно в зону дыхания каждого конкретного человека около рта. Это может быть достигнуто либо естественной конвекцией (всплыванием) тёплого выдыхаемого с ускорением воздуха, либо перемешиванием воздуха за счёт циркуляции и вентиляции в помещении, либо движениями самого человека. Например, в современном автомобиле правильно сконструированная вентиляция не просто вентилирует кабину водителя, а подаёт свежий воздух непосредственно в зону дыхания к лицу неподвижно сидящего водителя.

Вдыхаемый человеком свежий воздух содержит по объёму 21% кислорода и 0,03% углекислого газа CO_2 (в том числе и в виде угольной кислоты $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$), а выдыхаемый – 16% кислорода и 4% углекислого газа (табл. 10). То есть в лёгких происходит потребление 5% об. кислорода и выделение вместо него 4% об. углекислого газа (оставшийся в организме 1% об. кислорода выводится иными путями без участия дыхания). Концентрация углекислого газа в воздухе лёгких, равная 4% об., является критической для нормального вывода из крови накапливающегося (и хорошо растворимого) углекислого газа (см. таблицу 11). Поэтому нервные рецепторы в стенках аорты, реагирующие на большие концентрации угольной кислоты в крови, дают сигнал в нервный дыхательный центр, в результате чего у человека при такой концентрации углекислого газа в лёгких возникает непреодолимое желание выдохнуть отработанный воздух и вдохнуть свежий (ощущение удушья). Если при этом человек вдохнёт тот же воздух, что только что выдохнул, то он и на самом деле начнёт задыхаться, испытывать головную боль, появляется шум в ушах, замедляется пульс. Потеря сознания и смерть наступает при концентрации углекислого газа в воздухе порядка 10%. Вместе с тем, концентрацию углекислого газа 4% об. нельзя назвать уровнем токсичности углекислого газа в воздухе (предельно допустимой концентрацией ПДК), так как этот уровень человек сам себе специально создаёт в лёгких несколько раз в минуту и по существу считает его необходимым для жизни. В этом и заключается парадокс: уровень концентрации углекислого газа более 4% об. является уже недопустимым для лёгких, но в то же время жизненно необходим на короткие промежутки времени. Если начать дышать чаще, то происходит гипервентиляция лёгких, и человек может потерять сознание от недостатка углекислого газа в лёгких (точно так же, как и от его избытка). Этот парадокс, видимо, как-то связан с доисторическими условиями обитания млекопитающих. В частности, достоверно известно, что атмосфера Земли когда-то содержала больше углекислого газа. Как нетрудно подсчитать из объёма лёгких и объёма вдоха, нормальная концентрация кислорода и углекислого газа в лёгких колеблется в пределах 16,0–16,3% об. и 3,7–4,0% об. соответственно. Концентрация же кислоро-

да в альвеолах лёгких ещё ниже (до 12% об.), её человек устанавливает самостоятельно частотой и глубиной дыхания в зависимости от текущего состава атмосферы в среде обитания (нахождения).

Отметим попутно ряд интересных медицинских фактов. Вдыхание воздуха с (1–3) % об. углекислого газа в течение 10–14 минут в спокойном состоянии несколько повышает процент насыщения крови кислородом. При этом кратковременная физическая работа выполняется легче, утомление наступает позже, пульс и артериальное давление остаются в норме (Воронин, 1963 г.). Вдыхание воздуха с (5–15)% об. углекислого газа повышает содержание кислорода в мышце сердца (Саноцкая, 1966 г.). Так, в медицине при затруднённом дыхании используют смесь кислорода с 5% об. CO_2 («карбоген»). В то же время постоянное избыточное количество углекислого газа оказывает токсическое действие, а недостаток углекислого газа в организме (гипокапния) сопровождается нарушением дыхания.

Таблица 10

Состав атмосферного воздуха
(Краткий справочник химика, М.-Л.: Химия, 1964)

Газ	Содержание, %	
	по объёму	по массе
Азот	79,09	75,5
Кислород	20,95	23,10
Аргон	0,93	1,29
Неон	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Гелий	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Криптон	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Ксенон	$8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Радон	$6 \cdot 10^{-10}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$
Углекислый газ	0,03	0,046
Водород	$5 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
Озон	$2 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$
Закаись азота	$5 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$
Водяные пары	Сверх 100% с учётом относительной влажности	

Примечания:

1). Объёмное содержание газа X% об. соответствует парциальному давлению газа $p(\text{атм})=10^{-2} \cdot X\%$ об.

2). Объёмный состав воздуха, выдыхаемого человеком: 79,8% об. азота; 16,4% об. кислорода; 3,8% об. углекислого газа; водяные пары 6% об. сверх 100%.

Таблица 11

Растворимость газов в воде при 20°C (при парциальном давлении рассматриваемого газа, равном 1 атм)

Газ	Растворимость, м ³ /м ³
Азот	0,015
Гелий	0,014
Кислород	0,031
Аргон	0,038
Углекислый газ	0,88
Водород	0,018
Сернистый газ	39
Хлористый водород	440

Человек в нормальных условиях покоя пропускает через лёгкие около 0,5 м³ воздуха в час, необратимо потребляя примерно 20 литров кислорода в час. Поэтому, если бы мы вдыхали воздух из бани, а выдыхали наружу, то кислорода в бане объёмом 10 м³ нам хватило бы на 20 часов. Но человек выдыхает из лёгких воздух прямо в баню, и концентрация углекислого газа (в объёме бани 10 м³ на одного человека) начинает расти со скоростью 0,2% об. СО₂ в час. Уровень концентрации 0,1% об. СО₂, считающийся ещё как абсолютно свежий воздух, будет достигнут через полчаса, после чего для обеспечения особо комфортных условий воздух в бане можно полностью сменить. Скорость воздухообмена в бане составит при этом 20 м³/час (а кратность воздухообмена 2 раза в час) в расчёте на одного человека.

Помимо углекислого газа человек выделяет в бане до 1 литра пота в час, который может испаряться, увлажняя воздух и выделяя неприятные запахи. Повышенная влажность создаёт духоту (перегрев лёгких с ухудшением связывания кислорода гемоглобином крови) и малокомфортную жару. Для достижения хомотермального режима захочется сменить воздух. Скорость воздухообмена при этом состоит те же 20 м³/час на одного человека.

Что касается запахов (именно запахов), то они не расцениваются гигиенической наукой как вредные для здоровья факторы. По крайней мере, ни одна страна не умеет измерять запахи и не лимитирует пока количественно предельно-допустимый уровень запаха. Вместе с тем, общеизвестна невыносимость (для обычного человека) характерных запахов скученных масс людей (в том числе и в лечебно – медицинских стационарах – практологических, психоневрологических, травма-

тических и др.). Но тем не менее никто не контролирует там уровень запаха иначе как органами чувств (обонянием). Именно появление духоты и неприятных запахов чаще всего заставляет вентилировать помещение. Однако, запахи легче предупреждать, чем устранять вентиляцией, тем более общеобменной.

Вредные вещества (в том числе и пахучие) в воздухе закрытых помещений методически подразделяются на две многочисленные группы: обусловленные самим помещением (выделениями из строительных материалов, бытовых препаратов, продуктов питания, их разрушения и разложения) и обусловленные самим человеком (так называемые антропопотоксины). Антропопотоксины подразделяются на первичные (выдыхаемые из лёгких, носоглотки и рта, выделяемые с потом и кишечными газами, мочёй и фекалиями) и вторичные (образующиеся при микробиологическом разложении первичных антропопотоксинов). Первичные антропопотоксины (двууглекислый газ; гидриды – аммиак, сероводород, фосфин; амины; фенолы и т. п.) различны для разных людей (в том числе из-за индивидуальных заболеваний, например, кариеса зубов или грибковых заболеваний кожи), не столь уж токсичны (как бы «привычны», хоть и неприятны), изменчивы (в том числе за счёт духов, пудры, табака и т. п.). Вторичные антропопотоксины могут стать очень опасными для здоровья. Так застарелый пот с соляными отложениями (кислосолёный пот, а тем более пот бомжей) может быть ядовитым. Процессы гниения в тёплой застоявшейся воде душей, ванн, в конденсате кондиционеров вызывают развитие ряда опасных бактерий, типа легионеллы, вызывающей пневмонию («болезнь легионеров»).

Опытом многих тысячелетий установлено, что человек в бане (и не только в бане), хоть и поглощает кислород и выделяет антропопотоксины и запахи, тем не менее не создаёт за время банной процедуры сколько-нибудь seriously угрожающую его жизни и здоровью воздушную обстановку. Во всяком случае медиков больше беспокоят вещества, выделяемые строительными материалами. В таблице 12 приведены для сведений предельно-допустимые концентрации (ПДК) наиболее опасных, а потому нормируемых веществ, в контакте с которыми современный человек вынужден существовать всю жизнь.

Как и тысячи лет назад, в индивидуальных (посемейных) загородных банях непрерывная вентиляция бывает нужна вовсе не для сохранения жизни и здоровья (т. е. не для подачи кислорода для дыхания), а для сохранения комфортности за счёт снижения температуры и/или влажности воздуха и/или устранения запахов. В то же время для предотвращения действительно опасных для здоровья задымлений бани необходима возможность быстрых залповых проветриваний: угарность воздуха (за-

грязнённость окисью углерода) длительным лёгким проветриванием не устраняется.

Таблица 12

Перечень наиболее гигиенически значимых веществ, загрязняющих воздушную среду помещений жилых зданий (полный текст Приложения 2 к СанПиН 2.1.2.1002-00 «Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям»)

№ п/п	Наименование вещества	Формула	Величина ПДК среднесуточная, мг/м ³
1.	Азот (IV) оксид	NO ₂	0,04
2.	Аммиак	NH ₃	0,04
3.	Ацетальдегид	C ₂ H ₄ O	0,01
4.	Бензол	C ₆ H ₆	0,1
5.	Бутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	0,1
6.	Дистиламин	C ₂ H ₇ N	0,0025
7.	1,2 – Дихлорэтан	C ₂ H ₄ Cl ₂	1,0
8.	Ксилол	C ₈ H ₁₀	0,2
9.	Ртуть	Hg	0,0003
10.	Свинец и его неорганические соединения	Pb	0,0003
11.	Сероводород	H ₂ S	0,008
12.	Стирол	C ₈ H ₈	0,002
13.	Толуол	C ₇ H ₈	0,6
14.	Углерод оксид (окись углерода, угарный газ)	CO	3,0
15.	Фенол	C ₆ H ₆ O	0,003
16.	Формальдегид	CH ₂ O	0,01
17.	Диметилфталат	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	0,007
18.	Этилацетат	C ₄ H ₈ O ₄	0,1
19.	Этилбензол	C ₈ H ₁₀	0,02

В крупных банях, в том числе общественных, где залповые проветривания больших помещений невозможны, необходимо руководствоваться требованиями официальных нормативных документов. Так, в соответствии со СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование» (взамен бывших СНиП 2.04.05-91) минимальный расход наружного воздуха на 1 человека в жилых помещениях должен составлять при естественном проветривании 30 м³/час при площадях более 20 м² и 3 м³/час на 1 м² жилой площади при площадях менее 20 м², а при отсутствии естественного проветривания 60 м³/час принудительного притока при любой величине площадей. Указанные нормы установлены на 1 человека, находящегося в помещении более двух часов непрерывно, то есть в усло-

виях бань эти нормы применимы лишь для зон отдыха досуговых бань, а для парилок и мытьевых комнат могут оказаться чрезмерными. Само собой разумеется, при наличии факторов повышенной опасности, способных загазовать помещение бани (печей на твёрдом, жидком и газообразном топливе, газовых аппаратов, угарных каменок и т. п.), необходима возможность немедленной эвакуации людей с последующим проветриванием, в том числе с помощью местных отсосов.

В сухих саунах и помещениях бассейнов, ванн и душей задачей приточно-вытяжной вентиляции тоже является отнюдь не подача кислорода и вывод углекислого газа, а вывод избыточной влажности воздуха, но в разных целях. В помещениях бассейнов, ванн и душей избыточную влажность необходимо устранять для предотвращения осаждения росы на стенах и окнах, а в сухих саунах – для предотвращения возникновения духоты и чрезмерной жары. Причём в сухих саунах можно вполне чётко оценить необходимую скорость смены воздуха. Как мы рассчитали выше, она равна как минимум 20 м³/час на одного человека. При объёме сухой сауны 10 м³ и одновременном нахождении трёх человек необходимая кратность обмена воздуха должна составить не менее 6 раз в час, что соответствует финским рекомендациям. В нашей же стране правилами СанПиН 2.1.2.568-96 «Гигиенические требования к устройству, эксплуатации и качеству воды плавательных бассейнов» установлена нормативная кратность воздухообмена в саунах 5 раз в час по вытяжке периодического действия при отсутствии людей (?!) и без специального притока, в массажных комнатах 5 раз в час, в душевых – 10 раз в час, в раздевалках – 2 раза в час. Ранее долгие годы городские бани предусматривали по СНиП II-Л.8-62 (ныне отменённом) восьмикратный приток и девятикратную вытяжку в мыльных отделениях, что обычно составляло 55–85 м³/час воздухообмена на одного человека.

В особо сухих спортивных саунах кратность обмена воздуха повышают порой до десятков раз в час (для реализации «сухого потения» в целях быстрого сброса веса). В паровых же парилках повышенная влажность воздуха является самой сутью процедуры. Поэтому столь высокую кратность воздухообмена, как в сухих банях, применять нельзя. В СНиП 2.08.02-89 «Общественные здания и сооружения» установлена кратность вентиляции в парилках встроенных бань, равная единице.

Все эти нормативные величины являются столь значительными ввиду применения смесительной схемы вентиляции (см. далее) и в этом плане и их следует неукоснительно учитывать при проектировании систем вентиляции, по крайней мере, при выпуске официальных проектов (во избежание нареканий со стороны заказчиков и контролирующих инстанций). В то же время все понимают, что это условные цифры, испол-

зубые для выбора проектной мощности вентагрегатов и площади вентиляционных проёмов. А вот будут ли эти вентагрегаты потом реально монтироваться, будут ли они включаться, будут ли они использоваться лишь периодически при необходимости или работать постоянно, будут ли открываться окна и форточки или нет – все эти вопросы будут решаться дачником самостоятельно по собственному разумению. Поэтому бояться слишком высоких кратностей вентиляции (именно регулируемой вентиляции, а не неуправляемой инфильтрации воздуха через щели и неплотности), заложенных в проект, не стоит. Высокая проектная кратность вентиляции указывает лишь на большие возможности проектируемого объекта, и в этом вопросе лучше перестраховаться особенно во встроённых банях, чем потом мучиться в раздумьях, как всё же сделать вентиляцию помощней.

В рядовых отдельно стоящих дачных банях вопросы необходимой кратности вентиляции никогда не были и не будут определяющими. Если становится душно, дачник просто-напросто приоткрывает дверь или окно бани. Поэтому значительно большее влияние на комфортность банной процедуры оказывают вопросы равномерности вентиляции по объёму бани, отсутствия сквозняков и другие чисто аэродинамические аспекты.

Во многих публикациях по саунам специально и совершенно необоснованно подчёркивается, что высокая температура воздуха в сочетании с высокой влажностью обуславливает низкое содержание кислорода в воздухе и, как следствие, плохое самочувствие человека. Поэтому, мол, и следует получше вентилировать баню. При этом пребывание в парной с температурой 100°C приравняется (якобы в части нехватки кислорода для дыхания) к условиям высокогорья на высоте 2000 м. Подобные высказывания путают понятия объёмов воздуха и объёмов пространства.

Действительно, за счёт термического расширения воздуха при нагреве до температур порядка 100°C массовое (но не объёмное!) содержание кислорода (а также и азота) в 1 м^3 пространства снижается на 20–25%. Тем не менее, человек это не чувствует, поскольку при вдохе воздух охлаждается в гортани до 36°C , а потому и сжимается, массовое содержание кислорода в 1 м^3 пространства возвращается на нормальный уровень. В гортани и трахее банный воздух всегда охлаждается или нагревается, осушается или увлажняется (в зависимости от своего состояния) так, чтобы температура стала равна 36°C , а абсолютная влажность воздуха (массовое содержание водяных паров) $0,04 \text{ кг/м}^3$. А вот в условиях высокогорья человек своим дыханием не в состоянии сжать воздух и повысить его давление в альвеолах лёгких до нормального уровня и на самом деле может почувствовать недомогание из-за нехватки кислорода.

В заключение отметим, что в быту часто ошибочно отождествляют двуокись углерода CO_2 (углекислый, двууглекислый газ) с окисью углерода CO (угарным газом). Например, говорят, что, мол, так «надышали, что угорели совсем». На самом же деле, человек не выделяет окись углерода ни при дыхании, ни с потом. Угарный газ содержится в дымовых газах печей, в табачном дыму (до 0,5%), в выхлопах автомобилей (до 3%). Окись углерода (в отличии от двуокиси) очень токсична, поскольку намного лучше кислорода связывается с гемоглобином крови, что ведёт к потере сознания. Предельно допустимая концентрация CO в воздухе жилой зоны составляет 5 мг/м³ (0,0005% об.), в то время как в составе атмосферы его содержится в 50 раз меньше. Окись углерода не имеет ни цвета, ни запаха, очень плохо поглощается активированным углем обычного противогаса и требует использования спецпротивогазов со смесью окислов $\text{MnO}_2 + \text{CuO}$ («гопкалитом») для каталитического окисления кислородом воздуха. Если появляется в бане запах дыма, надо не вентилировать баню, а покинуть её и залповым образом проветрить.

4.1.3. Механическая и естественная вентиляция

Необходимую кратность вентиляции надёжней всего обеспечить механической (принудительной) вентиляцией, закладывая в проект приточные и вытяжные электрические агрегаты заданной производительности. Регулировка скорости вентиляции осуществляется при этом шиберами (задвижками, заслонками) на воздухозаборных и воздухоподающих воздуховодах.

Для дачных бань применимы самые маленькие бытовые вентиляторы (оконные, кухонные), обеспечивающие при электрической мощности всего 20–50 Вт производительность по воздуху не менее 50 м³/час. Электрические бытовые вентиляторы уже давно широко доступны для населения, но многие модели работоспособны лишь в сухом холодном воздухе и, как следствие, пригодны только для подачи свежего воздуха в баню. Поэтому целесообразней применять специализированные вытяжные вентиляторы для влажного воздуха ванн и душевых комнат, примерные характеристики которых иллюстрируются в таблице 13. Однако на высокие температуры эти вентиляторы не рассчитаны и требуют предварительного охлаждения воздуха. Можно их использовать и для организации циркуляции (рециркуляции) воздуха в помещении бани на этапе протопки. Напомним, что принудительная вытяжка в банях с печным отоплением запрещена (СНиП41-01-2003).

Основное предпочтение дачниками отдаётся залповым проветриваниям через двери, а также естественной вентиляции через приоткрытые

проёмы (окна, двери, продухи, форточки) или через специально предусмотренные щели (чаще всего над и под дверями).

Таблица 13

Характеристики вытяжных вентиляторов для ванных комнат
(на примере изделий фирмы Silavent, Англия)

Модель	Мощность, Вт	Расход воздуха, м ³ /час	Статическое давление, Па	Уровень шума, Дб	Вес, кг
Extract 2000	20	70	16	33	0,7
Extract 120	35	162	30	36	0,8
Curzon 2000	50	80	150	26	1,1
SVC6	35	240	50	37	1,6
SDF100	20	70	16	36	0,6
SDF120	35	162	30	36	0,8
DVF100	20	70	16	41	0,5
DVF150	25	220	45	41	1,3
Energex	40	72	–	35	1,8

В отличие от механической вентиляции эффективность естественной вентиляции (то есть вентиляции с естественным побуждением) оценивается весьма сложно, а главное не очень надёжно. В строительной науке производительность естественной вентиляции рассчитывается численными методами, развиваемыми в теории теплозащиты зданий в части тепловых потерь, обусловленных воздухопроницаемостью ограждающих конструкций (см. раздел 3). Соответствующие нормативные документы СНиП41-01-2003 (взамен СНиП2.04.05-91), СНиП23-02-2003 и СП23-101-2000 (взамен СНиП II-3-79) содержат, к сожалению, разночтения и постоянно дорабатывается.

В самом общем случае скорость обмена воздуха G_B за счёт естественной вентиляции определяется суммой четырёх слагаемых (см. Приложение 10 к СНиП2.04.05-91):

$$G_B(\text{кг/час})/\rho(\text{кг/м}^3) = G_B(\text{м}^3/\text{час}) = \sum S_{i1} \Delta p_i / R_{i\rho} + \sum (\Delta p_i / \Delta p_0)^{0,67} \cdot S_{2i} G_{2i} / \rho + 3600 \sum S_{3i} (2 \Delta p_i / \rho)^{1/2} + \sum (\Delta p_i / \Delta p_0) \cdot L \cdot G_3 / \rho.$$

Первое слагаемое определяет неконтролируемую инфильтрацию воздуха через ветропроницаемые стены (см. раздел 3), имеющие участки с площадями S_{i1} с табличными сопротивлениями воздухопроницанию $R_{i\rho}$ (см. таблицу 2) при перепадах давления на стенах Δp_i . Плотность воздуха, в бане и на улице изменяющаяся в пределах (0,9–1,4) кг/м³, обычно принимается равной в среднем $\rho = 1,2$ кг/м³.

Второе слагаемое определяет неконтролируемую инфильтрацию воздуха через закрытые окна и двери с площадями S_{2i} и воздухопроницаемостями G_{2i} , указываемыми в технических паспортах на продукцию (см. также таблицу 3). Перепад давления Δp_0 отвечает тому перепаду давления, для которого определяется паспортная величина воздухопроницаемости или сопротивления воздухопроницанию (обычно $\Delta p_0=10$ Па). Как уже отмечалось, скорость движения воздуха через мелкие поры в стенах определяется вязкостью воздуха и пропорциональна перепаду давления Δp_i , через крупные же проёмы определяется не вязкостью, а инерцией воздуха и пропорциональна корню квадратному $(\Delta p_i)^{1/2}$, а через окна (сочетающие и крупные, и мелкие щели) – пропорциональна $(a\Delta p_i + b(\Delta p_i)^{1/2}) \sim (\Delta p_i)^n$, где n чаще всего принимается равным $2/3=0,67$. Фактически это (и последующее) слагаемое показывает, до какой скорости может разогнаться воздух за счёт заданного перепада давлений в проёме.

Третье слагаемое определяет поступление воздуха через крупные проёмы (вентотверстия) с поперечным размером более (5–10) мм – окна и двери с площадями S_{3i} .

Четвёртое слагаемое определяет неконтролируемую инфильтрацию воздуха через малые щели с поперечным размером менее (1–5) мм длиной L и воздухопроницаемостью $G_3=0,5$ кг/м·час (для стыков между панелями наружных стен по СНиП23-02-2003).

При строительстве дачных бань необходимо максимально предотвращать неконтролируемую инфильтрацию через стены так, чтобы кратность воздухообмена определялась бы только контролируемыми поступлениями воздуха через вентотверстия. А вот в общественных банях оказывается более важным наличие некоторого гарантированного минимально необходимого воздухообмена (например, с кратностью 1 раз в час) за счёт неконтролируемой инфильтрации. Это обусловлено тем, что многочисленные случайные посетители могут произвольно (и не всегда осознанно и правильно) изменять циркуляцию воздуха в бане и даже прекращать поступления свежего воздуха в баню самовольным прикрытием форточек и вентотверстий. Поэтому в общественных банях совершенно необходимо предусматривать регулируемое (но не способное полностью закрываться) вытяжное вентотверстие в потолке или в припотолочной части стен бани. При этом, разумеется, во избежание увлажнения стен, неконтролируемая инфильтрация через стены допустима в банях только для приточного воздуха, то есть в нижних зонах бани.

В вышеприведённом соотношении для скорости обмена воздуха G_v за счёт естественной вентиляции под перепадом давления Δp_i понимается сумма гравитационных и ветровых (динамических) перепадов давления $\Delta p_i = \Delta p_r + \Delta p_v$. Гравитационные перепады давления $\Delta p_r = (2-5)$ Па существ-

вуют внутри протопленных бань всегда, что гарантирует возможность немедленного проветривания в любой момент времени, в том числе залпового через распахнутые двери. Ветровые перепады давления Δp_v возникают лишь при наличии ветра, набегającego на здание бани, и могут достигать сотен паскалей (20 Па при слабом ветре).

4.1.4. Гравитационные перепады давления

Гравитационные (свободноконвективные) движения воздуха – это всплывание горячего воздуха в среде холодного воздуха, а также утапливание холодного воздуха в среде горячего воздуха. Это происходит потому, что горячий (тёплый) воздух легче холодного.

С другой стороны гравитационные движения воздуха (как и любые движения газа) возникают как перемещение (выталкивание) воздуха из зон повышенного давления в зоны пониженного давления, причём эти давления создаются естественными факторами – гравитационными силами (силами тяжести). При отсутствии перемещений воздуха давление воздуха (динамическое, совпадающее со статическим) равно весу воздушного столба, расположенного над рассматриваемой точкой. Так что давление воздуха в горячей бане у потолка (соединенного с атмосферой) равно давлению воздуха вне бани на том же высотном уровне, поскольку над горячей баней находится точно такой же атмосферный воздух, что и рядом с баней. Но давление воздуха у пола бани ниже атмосферного на том же высотном уровне, поскольку вес горячего воздуха в бане меньше веса холодного атмосферного воздуха вне бани. Разность давлений воздуха у пола в бане и воздуха вне бани (на том же высотном уровне пола бани) будет равна $\Delta p_r = (\rho_b - \rho_a) \cdot g \cdot H$, где ρ_b и ρ_a – плотности воздуха в бане и вне бани соответственно, $g = 9,8$ м/сек² – ускорение свободного падения, H – высота бани от пола до потолка. Поскольку ρ (кг/м³) = $353 / (273 + t)$, перепад давлений Δp при температуре вне бани $t_a = 0^\circ\text{C}$ и температуре в бане $t_b = 100^\circ\text{C}$ для высоты бани $H = 3$ м составляет минус 10 Па (10⁻⁴ атм). Этот перепад давления и создаёт возможность проветривания бани даже при полном отсутствии ветра вне бани. Напомним, что $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/сек}^2 = 10^{-5} \text{ атм}$.

Наличие перепадов давления на стенах иногда приводит любителей бань к мысли, что многие явления в бане обусловлены именно этим фактором. Так, есть мнение, что баня хороша именно тем, что является зоной повышенного (или пониженного) давления, и это объясняет потение (или наоборот, лёгкое испарение пота), повышение (или понижение) артериального давления и т. п. Поэтому напомним, что если в бане перепады давления составляют 10 Па, то в жилых помещениях при нормальной

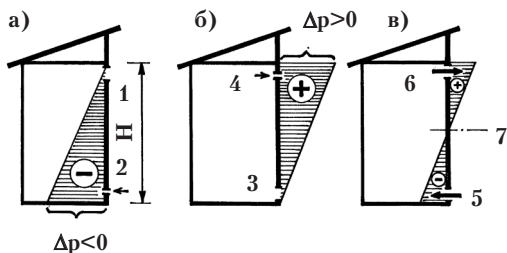


Рис. 42. Эпюры (распределения) перепадов давления на стенах бани (разностей давлений внутри и вне бани на одних высотных уровнях) при наличии в бане горячего воздуха: а) – при открытом верхнем отверстии давление внутри меньше, чем снаружи, б) – при открытом нижнем отверстии давление внутри

больше, чем снаружи, в) – при открытых верхнем и нижнем отверстиях давление наверху внутри больше, чем снаружи, а давление внизу меньше, чем снаружи, поэтому возникает поток вентиляционного воздуха. Знак минус в эпюрах означает разрежение в бане, а знак плюс – избыток давления (напор) в бане.

эксплуатации – до 100 Па, а в земной атмосфере циклоны и антициклоны изменяют атмосферное давление на величины до 5000 Па.

На рисунке 42а представлена эпюра разности давлений воздуха в бане и вне бани. Если открыть верхнее вентиляционное отверстие 1, то никаких перемещений воздуха наблюдаться не будет, поскольку давления в бане и вне бани на этом высотном уровне одинаковы (возможны лишь циркуляционные явления, связанные с «падением» холодного воздуха в нижнюю часть проёма вентиляционного отверстия, при значительной высоте проёма 1, см. далее). Если же слегка приоткрыть «пробное» отверстие 2, то можно убедиться, что воздух затягивается в баню (точно так же, как засасывается воздух в печку через поддувало).

Теперь закроем верхнее вентиляционное отверстие 1 и откроем нижнее вентиляционное отверстие 3 (рис 42б). Воздух из атмосферы рванётся в баню, создав в ней у пола давление, равное атмосферному на том же высотном уровне. При этом весь воздух в бане, которому выходить некуда, сожмётся. При этом давление у потолка бани станет выше атмосферного на том же высотном уровне. Приоткрыв «пробное» отверстие 4, можно убедиться, что воздух выходит наружу. Можно даже измерить величину этого избыточного давления в бане мембранным манометром (но не водяным или ртутным, поскольку 10 Па соответствует 1 мм водяного столба).

Если открыть нижнее 5 и верхнее 6 вентиляционные отверстия одновременно, то у потолка бани сохранится повышенное давление, а у пола – пониженное (рис. 42в). Через нижнее отверстие 5 будет поступать приточный воздух, а через верхнее отверстие 6 – удаляться вытяжной воздух. Возникает непрерывный (при подогреве приточного воздуха) поток вентиляционного воздуха снизу вверх, описываемый уравнением Бернулли для идеальных (безвязкостных) жидкостей (газов) $p + \rho gh + \rho V^2/2 = \text{const}$, где p – статическое давление, ρgh – вес столба воз-

духа над рассматриваемой точкой (гравитационное давление), V – скорость перемещения воздуха, $p_r = p + \rho V^2/2$ – динамическое давление (полное давление, давление торможения). Иными словами, при возникновении потока воздуха графики давлений на рис. 42а и б надо сдвинуть на величину $\rho V^2/2$, равную 0,6 Па при $V=1$ м/сек или 2,4 Па при 2 м/сек. При этом, в бане появляется некий уровень 7 (так называемая «нейтральная линия»), разделяющий зоны положительного и отрицательного статических давлений. Если сделать дополнительное вентиляционное отверстие на уровне 7, то воздух в нем перемещаться не будет. В зависимости от соотношений размеров верхнего и нижнего вентиляционных отверстий уровень 7 может перемещаться вверх или вниз.

В многоэтажных жилых домах вентиляционных отверстий много, и эпора давлений может быть сложной. В простейших же банях оценки можно производить исходя из гравитационных перепадов давлений $\Delta p_r = (2-5)$ Па (для характерных температур в бане 50–100°С). Исходя из уравнения Бернулли линейная скорость в вентотверстии может достигать при этом V (м/сек) $= (1,66 \Delta p_r (\text{Па}))^{1/2}$, то есть $V_r = (1,8-2,9)$ м/сек. Таким образом, при площадях вентиляционных отверстий 1 дм² (10×10 см) можно рассчитывать на скорость вентиляции не более (70–100) м³/час, а с учётом вязкости воздуха, газодинамических потерь внутри бани, а также при расположении отверстий ниже уровня потолка и выше уровня пола ещё в 1,5–2 раза меньше. Поскольку коэффициент расхода приточных отверстий больше, чем вытяжных, то верхнее вентотверстие делают в 1,5–2 раза большим, чем нижнее.

Рекомендуются следующие скорости воздуха в системах вентиляции (в м/сек):

Элемент вентиляции	Естественная вентиляция	Механическая вентиляция
Воздухоприёмные жалюзи	0,5–1	2–4
Воздухоприёмные каналы	1–2	2–6
Распределительные каналы:		
– горизонтальные	0,5–1	5–8
– вертикальные	0,5–1,5	2–5
Приточные решётки:		
– у пола	0,2–0,5	0,2–0,5
– у потолка	0,5–1	1–2
Вытяжные решётки у потолка	0,5–1	1–2
Вытяжные шахты	1–1,5	3–6

При установке дефлекторов указанные скорости воздуха при естественной вентиляции увеличиваются на 25%.

Таким образом, для общеобменной вентиляции бань можно рекомендовать делать регулируемые вентотверстия в потолке или в верхней части стен в расчёте 50 см² на одного человека при наличии возможности залпового вентилирования через двери и 100 см² при отсутствии такой возможности.

Напомним для сравнения, что в многоэтажном городском жилищном строительстве рекомендуются следующие площади проходного сечения вентиляционных отверстий для естественной вытяжки: кухни – 150 см², ванны комнаты – 150 см², туалеты – 100 см², душевые – 100 см². Считается, что такие отверстия обеспечивают скорости естественной вентиляции на уровне (20–90) м³/час в зависимости от этажности здания и времени года. Шумы в вентканалах с поперечным сечением 100 см² могут возникать из-за появления турбулентности уже при 0,3–0,5 м/сек, а в вентотверстиях сечением 1 см² при 3–5 м/сек. Поэтому вентиляционные короба в ответственных помещениях звукоизолируют (обклеивают пенорезиной). Напомним, что с увеличением скорости движения газов (и жидкостей) частота шумов увеличивается (гул постепенно переходит в вой, а затем в свист), что положено в основу действия некоторых моделей газовых расходомеров – акустических частотомеров.

4.1.5. Ветровые перепады давления

Вентиляция за счёт ветрового напора описывается упрощённым уравнением Бернулли $p_t = p + \rho V^2 / 2$, где p_t – давление торможения. Ветровой напор ($p_t - p$) равен 0,6 Па при скорости ветра 1 м/сек (штиль); равен 15 Па при скорости ветра 10 м/сек (сильный ветер); равен 540 Па при скорости ветра 30 м/сек (ураган).

Уравнение Бернулли означает, что идеальная (безвязкостная) жидкость (газ) может ускоряться (тормозиться) только за счёт снижения (повышения) своего статического давления. Так, при течении жидкости (газа) по трубе статическое давление в местах сужения уменьшается (поскольку увеличивается скорость), а затем при расширении трубы до прежнего диаметра возвращается на прежний уровень (рис. 43а). В частности, этот эффект используется в пульверизаторах (рис. 44).

Если мысленно соединить отдельные части трубы 1 (рис. 43а) пробными трубочками – каналами 3, то станет ясно, что возможно образование упорядоченных движений газа навстречу по потоку (вихрей). Действительно, турбулентность (образование вихрей) является характерной чертой идеальной жидкости (газа): если в потоке возникают флуктуации скорости (расширения трубок тока), то автоматически возникают вихри и пульсации (рис. 43б).

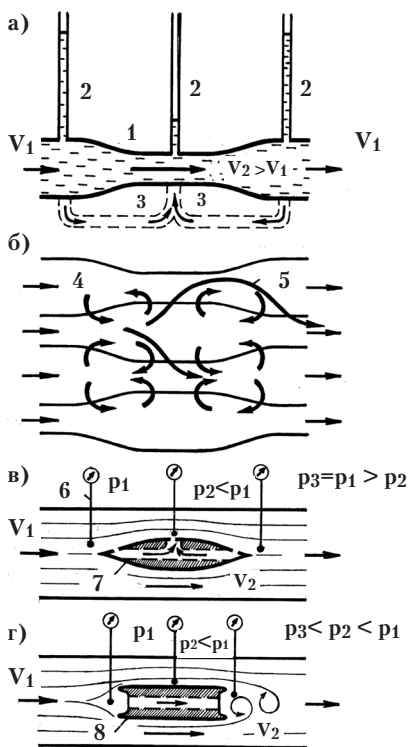


Рис. 43. Иллюстрированные пояснения законов Бернулли и механизмов возникновения турбулентности: 1 – труба с заужением, в которой жидкость (газ) ускоряется со скорости V_1 до скорости V_2 , 2 – барометрические трубки, измеряющие статическое давление p_1 (до зауживания), p_2 (в месте зауживания), p_3 (после зауживания), 3 – пробные (умозрительные) каналы, по течению жидкости (газа) в которых можно судить о распределении статических давлений и о возможности возникновения вихрей, переносящих жидкость (газ) вперед и назад по потоку (аналогичные пробные каналы изображены пунктиром внутри обтекаемого тела на рис. в и г), 4 – микроциркуляционные движения газа из расширяющихся зон с пониженной скоростью течения и повышенным давлением в зоны с повышенной скоростью течения и пониженным давлением, 5 – пульсационные движения газа, возникающие при появлении зон с повышенной и пониженной скоростью течения, 6 – манометры, 7 – обтекаемое тело в ламинарном потоке газа, 8 – плохообтекаемое тело с турбулизацией потока газа.

Аналогичная картина возникает и при обтекании тела потоком жидкости (газа). Если тело обтекаемое, то при малых скоростях потока течение не только ламинарно (то есть нетурбулентно), но и симметрично: в «носике» – плавно смыкается так, что давление впереди и сзади равно, и аэродинамическое сопротивление отсутствует (очень мало) (рис. 43в). Но и в этом случае, мысленно «рисую» внутри тела трубочки-каналы, можно убедиться, что газ из «хвоста» вполне может стремиться двигаться вперед в зону пониженных давлений (повышенных скоростей потока), возникающих из-за обтекания тела. Склонность в вихреобразование отчётливо проявляется при ухудшении обтекаемости тела и при увеличении скорости обтекания, когда в «хвосте» образуется зона вихрей – турбулентный след (рис. 43г). В вихревой зоне газ движется в вихрях с большой скоростью, вследствие чего статическое давление в «хвосте» уменьшается. И хотя эта вихревая зона «засасывает» в себя воздух, давление в ней мало именно из-за вихрей. Именно из-за турбулентности в «хвосте» возникает аэродинамическое сопротивление (перепад давлений в «носике» и в «хвосте» $\Delta p = p_1 - p_3$).

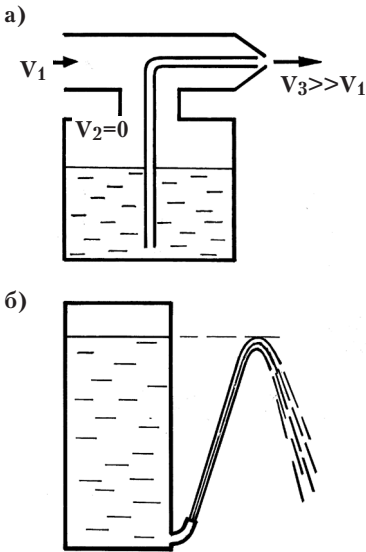


Рис. 44. Практические следствия закона Бернулли: а) – пульверизатор создаёт нулевую скорость газа у поверхности воды $V_2=0$ и повышенную скорость газа в сопле $V_3 \gg V_1$, вследствие чего в трубке возникает перепад давления и появляется поток жидкости к соплу, б) – жидкость у дна сосуда, сжатая собственным весом до давления $p=pgh$, вырывается из отверстия со скоростью $V=(2p/\rho)^{1/2}=(2gh)^{1/2}$ и образует фонтан высотой в точности до поверхности воды в сосуде (при отсутствии вязкости).

Таким образом, если в идеальном газе где-то возникает повышенная скорость течения, то газ тотчас устремляется в эту зону, ещё больше увеличивая скорость течения (то есть образуется вихрь). Но идеальных газов не бывает, любой газ обладает пусть низкой, но вполне отличной от нуля вязкостью (см. раздел 3). Основополагающим понятием является число Рейнольдса $Re=\rho Va/\mu=Va/\nu$, где ρ – плотность газа, V – скорость движения газа и $\nu=\mu/\rho$ – кинематическая и динамическая вязкость газа, a – характерный поперечный размер препятствия или трубы. При больших числах Рейнольдса преобладают свойства идеальной жидкости, то есть преобладают инерционные силы, взвихривающие поток. При малых числах Рейнольдса преобладают силы вязкости, гасящие вихревые движения.

В трубах турбулизация наступает при числах Рейнольдса более 2200. При обтеканиях же тел (препятствий) искажения ламинарности потока появляются при $Re=1-10$, турбулентный след образуется при $Re>20$, при $Re>500$ возникают пульсации турбулентного слоя (пытающегося «вылезти» на боковую часть тела), при $Re>300000$ воздух полностью турбулизуется за всем телом.

Для воздуха $\nu=0,14 \text{ см}^2/\text{сек}$ и поэтому $Re=7 \cdot Va$, где V – скорость потока воздуха в см/сек, a – поперечный размер трубы или препятствия в см. То есть при характерном размере здания бани $a=300 \text{ см}$ и скорости ветра 100 см/сек число Рейнольдса составляет $2 \cdot 10^5$, то есть воздух за зданием бани заведомо турбулизуется уже при малейших дуновениях ветерка (ветер 1 м/сек – полный штиль). В щелях бани толщиной 1 мм турбулентность может наступить лишь при скоростях движения воздуха в них более 30 м/сек (скорости урагана). Это значит, что воздух в щелях (и порах) всегда течёт ламинарно со скоростями, пропорциональными $\Delta p/\mu$

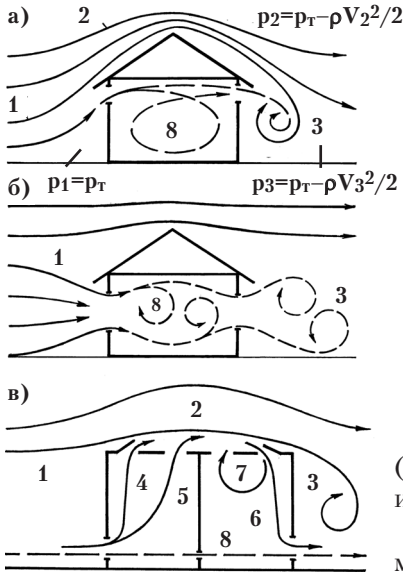


Рис. 45. Схема обтекания здания потоком ветра: а) – образование зоны торможения, турбулентной зоны и возникновение возможности сквозного продува; б) – гипотетическая схема сквозного продува ускоряющимся в окне ветром (без образования зоны торможения); в) – возникновение несковязного продува: 1 – набегающий поток ветра, 2 – обтекающий поток ветра, 3 – турбулентная зона на подветренной стороне здания, 4 и 5 – отсосы воздуха (в том числе через вентиляцию) в поток ускоренного ветра с дефлектором 4 и без дефлектора 5, 6 – захват приточного воздуха воздухозаборником, 7 – образование вихревого потока, 8 – сквозной продув (пунктир).

(вязкостный режим течения, см. первое и четвертое слагаемые для G_B).

Таким образом, внешняя газодинамическая картина, формирующая внутреннюю вентиляцию здания, выглядит следующим образом (рис. 45а). Ветер 1, набегающий на здание со скоростью V_0 , тормозится до скорости $V_1 = 0$, создавая статическое давление p_1 на наветренной стороне, равное давлению торможения $p_T = p_1 + \rho V_1^2 / 2 = p_1 = p + \rho V_0^2 / 2$, где p – атмосферное давление. В зоне над зданием статическое давление равно $p_2 = p_T - \rho V_2^2 / 2$, где V_2 – скорость ветра над зданием, близкая к скорости набегающего ветра, то есть p_2 близко к атмосферному давлению. За зданием статическое давление $p_3 = p_T - \rho V_3^2 / 2$, где V_3 – скорость воздуха в вихрях. Если здание обтекается ламинарно (без образования турбулентной зоны 3), то $p_3 = p_T$, и, следовательно, аэродинамического сопротивления здание не оказывает.

Если теперь откроем окно на наветренной стороне, то давление внутри здания скачком повысится на величину ветрового напора $\rho V_0^2 / 2$, то есть до p_1 . Но если открыть окно на подветренной стороне, то давление внутри здания скачком понизится до p_3 . Если же одновременно открыть и переднее, и заднее окна, то возникнет сквозной поток воздуха через здание за счёт перепада давлений $p_1 - p_3 = \rho V_3^2 / 2$ (не зависящего от ветрового напора). Если открыть одновременно окно на наветренной стороне и на крыше (рис. 45в), то возникает поток воздуха 5 за счёт перепада давлений $p_1 - p_2 = \rho V_2^2 / 2$, близкого по величине к ветровому напору $\rho V_0^2 / 2$.

Схемы движения вентиляционного воздуха внутри здания могут быть самыми разными, в том числе и с помощью дефлекторов 4 и рефлекторов 6 (воздухозаборников). Скорости вентиляционных потоков определяют-

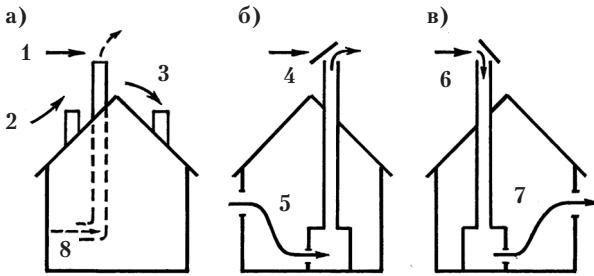


Рис. 46. Схемы обтекания вытяжных (в том числе дымовых) труб потоком ветра: 1 – труба в горизонтальном потоке, 2 – в восходящем потоке, 3 – в нисходящем потоке, 4 – усиление вытяжки с помощью дефлектора (флюгера), 5 – нагнетание воздуха напором ветра с наветренной стороны, 6 – нагнетание воздуха в трубу напором ветра с помощью рефлектора, 7 – вытяжка воздуха в подветренную сторону (6 и 7 отвечают режиму дымления печи), 8 – пунктирная схема – действительная причина появления тяги в стояки из-за ветра заключается в задуве ветра в наветренное отверстие стояка, а не в вытяжке в поток 1.

ся всеми окнами (проёмами) одновременно, а потому рассчитывать их трудно. В нормативных строительных документах молчаливо подразумевается, что в здании всегда обеспечивается давление, близкое к атмосферному p (или давлению над зданием p_2), за счёт, например, высокопроизводительных вентиляционных стояков 5 (рис. 45в) или 4 (рис. 46). В этом случае, скорость вентиляции за счёт ветрового напора рассчитывается как скорость движения воздуха через каждый проём (а не через каждые два последовательных проёма – входного и выходного – одновременно), равная согласно уравнению Бернулли $V_v = (2\Delta p / \rho)^{1/2}$, где Δp – перепад давлений на проёме. Поскольку статическое давление в заторможенном воздухе наветренной зоны равно $p_1 = p + \rho V_0^2 / 2$, где V_0 – скорость ветра, а статическое давление внутри здания равно p , то в наветренном проёме возникает перепад давления $\Delta p = \rho V_0^2 / 2$, называемый ветровым напором. Отсюда следует, что скорость приточного воздуха в наветренном проёме равна скорости ветра $V_v = (2\Delta p / \rho)^{1/2} = (2 \cdot \rho V_0^2 / 2\rho)^{1/2} = V_0$.

Такой простой наглядный результат широко используется в инженерно-строительных расчётах, в том числе и печных (где дымовая труба заведомо обладает много большей производительностью, нежели воздухозаборные отверстия поддува). Так, если, например, площадь наветренной стены бани равна 10 м^2 , а площадь щелей и вентотверстий на наветренной стороне равна 10 см^2 , то в баню при скорости ветра $V_0 = 1 \text{ м/сек}$ проникает всего лишь $3,6 \text{ м}^3/\text{час}$ (то есть очень небольшая часть набегающего на стену потока $36000 \text{ м}^3/\text{час}$). Практически весь набегающий воздушный поток $36000 \text{ м}^3/\text{час}$ обтекает здание бани с боков и сверху. То есть линии тока ветра 1 (рис. 45а) перед зданием расходятся, образуя перед зданием расширяющуюся трубку тока, в которой скорость движе-

ния воздуха уменьшается, а давление повышается, что научно разъясняет физический смысл понятия ветрового напора на здание.

В то же время в быту часто считают, что скорость воздуха в окнах и форточках может быть намного больше скорости ветра. Такое мнение базируется на том житейском наблюдении, что ветер в промежутках между зданиями дует сильнее, чем во дворах, а это значит, что в любом узиле (например, форточке) ветер должен двигаться быстрее. Действительно, предположим что воздух в любое отверстие входит по сужающейся трубке тока (рис. 45б), а поэтому с ускорением. В таком случае, внутри помещения должно создаваться разрежение, а при выходе из помещения с подветренной (задней) стороны воздух повышает своё давление, поскольку трубка тока вновь расширяется. Последние заключения уже не столь очевидны, более того, противоречат житейскому здравому смыслу, поскольку при порывах ветра в помещениях повышается давление, а не снижается, а поэтому и первичный тезис не верен.

С физической точки зрения сужающаяся трубка тока возможна лишь при воздухо непроницаемости стенок трубки. В противном случае воздух из соседних трубок тока устремляется в ускоряющийся воздушный поток (рис. 43б), создавая турбулентности, но снижая скорость потока. Как раз таких воздухо непроницаемых стенок у трубок тока на рис. 45б нет и быть не может. Таким образом, воздушный поток входит в проём не в сужающейся трубке тока, а в расширяющейся, то есть с торможением.

Что касается кажущегося ускорения ветра в промежутках между зданиями, то необходимо иметь ввиду, что над зданием движется невозмущенный ветровой поток, непосредственно контактирующий с нижележащими слоями воздуха и являющийся буфером, принимающим воздух снизу и отдающим вниз. Это приводит к турбулизации ветровых потоков (и на пустыре, и во дворах, и между зданиями). Поэтому направленная скорость ветра в промежутках между зданиями принципиально не может превышать скорость ветра на пустырях и вне домов за городом.

Все вышесказанное о скорости воздуха в проеме относится только к случаю ничем не ограниченных в пространстве свободных течений, когда перепады давлений на замкнутых траекториях равны нулю. Течения в трубопроводах (в дымоходах печей и воздухопроводах вентиляционных систем), как правило, не свободны (см. раздел 5.7.6) - скорость воздуха увеличивается в местах сужений (по закону сохранения массы), причем за счет локального снижения давления. Появление турбулентностей газовых потоков в трубе тормозит поступательное движение - если где-то в трубе газ закрутился в вихрь, то поступательная скорость газа уходит в скорость вихря. Газ при этом как-бы останавливается в трубе, что воспринимается как торможение,

как сопротивление потоку, как повышение давления по тракту. Турбулентности снижают поступательные скорости потоков, что учитывается коэффициентами истечения или коэффициентами местных газодинамических сопротивлений (см. далее раздел 5.7.4).

Продуваемость здания (как через специальные проёмы, так и через стены) не может обеспечить контролируруемую вентиляцию и зачастую играет отнюдь не полезную, а вредную роль. Тем не менее она ценна для вентиляции с помощью залповых проветриваний. При этом вытяжка через боковые стены или потолок (крышу) многокомнатных зданий вверх 5 (в том числе через вентиляционные вытяжные трубы) является зачастую практически более важной, чем вытяжка через подветренную сторону 6 (рис. 45в). При этом с помощью дефлекторов (флюгеров) 4 или, наоборот, рефлекторов (воздухозаборников) 7 можно сильно изменить механизм вытяжки созданием особых (наветренных с повышенным давлением или подветренных с пониженным давлением) зон в обтекающем потоке.

Часто говорят, что для надёжной вентиляции помещений здания необходимо поместить верхний срез вытяжной трубы в невозмущённый ветровой поток 1 (рис. 46), и при этом вытяжка будет тем сильнее, чем больше скорость ветра. При всей своей формальной правильности такая трактовка вентиляционного механизма содержит существенные недосказанности. Вытяжка будет более эффективной при восходящем потоке 2, когда срез трубы играет роль дефлектора. Но та же труба при смене направления ветра окажется в нисходящем потоке 3 и будет выполнять роль рефлектора 6. Кроме того, совершенно ясно, что вытяжная труба является лишь завершающей частью пути вентиляционного потока в помещении, а начинается этот поток в проёмах стен (окнах, дверях, форточках). Именно задув ветра в помещение через стенные проёмы 5 (и как следствие, повышение давления внутри здания) является основным фактором ветровой вентиляции помещения (8 на рис. 46). Так, если приточное отверстие расположено на наветренной стороне, то труба 1 действительно будет вытяжной, а если на подветренной – то труба 1 станет, возможно, и приточной. Это, видимо, безразлично для консервирующей вентиляции, но для общеобменной вентиляции очень важно вовремя открывать те или иные окна в зависимости от направления ветра.

Нестабильность ветровой вентиляции приводит к тому, что на практике предпочитают создавать вентиляцию преимущественно на гравитационном принципе, используя тот факт, что температура вытяжного воздуха является более высокой, чем температура наружного атмосферного воздуха. Именно в этом случае особенно важно расположение оголовка вытяжной трубы в невозмущённом потоке 1, чтобы порывы ветра не нарушали работу гравитационной вентиляции. Для сокращения

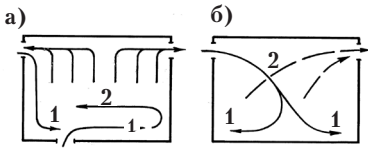


Рис. 47. Схема ламинарного принудительного ввода холодного приточного воздуха в горячий воздух бани (вид сбоку): а) – малая скорость приточного воздуха (растекание), б) – высокая скорость приточного воздуха (дальнобойные струи). 1 – холодный приточный воздух (тяжёлый, тонущий), 2 – вытесняемый горячий вытяжной воздух (лёгкий, всплывающий). Циркуляция и турбулентность воздуха не учитываются.

отрицательной роли ветра, вентиляционные трубы (стояки), в том числе и дымовые, делают как можно более высокими (чтобы гравитационные перепады давления ρgh превышали возможные напоры ветра $\rho V_0^2/2$), а на оголовки труб монтируют дефлекторы-флюгеры, работоспособные при всех направлениях ветра.

Ясно, что основное воздействие на баню оказывают порывы ветра, способные выхолодить и задымить помещение. Что касается постоянно работающих бань, то для официальных оценок среднегодового влияния ветровой вентиляции рекомендуется нормируемое в СНиП23-02-2003 усреднённое соотношение для перепада давления на стенах здания, создаваемого ветровыми напорами: $\Delta p_v = 0,03\rho V^2$, где V – максимальная из средних скоростей ветра по румбам (направлениям). Отсюда следует, что среднегодовое влияние ветра начинает превосходить влияние гравитационных факторов в банях при скоростях более (7–11)м/сек.

4.1.6. Движение вентиляционного воздуха внутри бани

Для оценки эффективности вентиляции надо знать не только скорость подачи свежего воздуха в баню, но и траекторию распространения свежего воздуха внутри бани. При малых скоростях принудительного ввода холодный приточный воздух, как более тяжёлый, тонет в горячем воздухе бани, устремляясь ламинарными потоками вниз, растекаясь по полу и вытесняя горячий воздух вверх (рис. 47а). С увеличением скорости ввода, приточный воздух образует дальнобойные струи, также устремляющиеся вниз, но перемешивающиеся с восходящими горячими потоками (рис. 47б). При очень больших скоростях приточный воздух идёт «сквозняком» по потолку, не успевая перемешаться.

Типичным случаем является охлаждение пола («дует по полу»), но наибольший интерес для вентиляции бань (а также и для печей) представляет дальнобойный ввод воздуха, имеющий место уже при перепадах давления 0,1 Па и при скоростях воздуха в проёме (0,3–0,5) м/сек. При заборе приточного воздуха (а также при отсосе воздуха из помещения) на всасывающей стороне проёма возникают так называемые всасы-

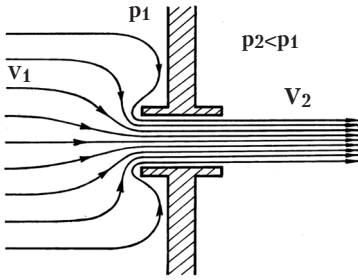
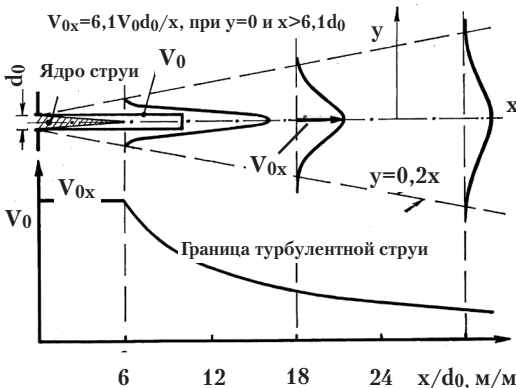


Рис. 48. Схема линий потока воздуха, подаваемого под напором (перепадом давления $\Delta p = p_1 - p_2$) через отверстие (при незначительности сил вязкости). Слева – всасывающий спектр в осесимметричный сток. Справа – направленная осесимметричная струя (модель пылесоса).

вающие спектры (стоки), описывающие движения воздуха в приёмное отверстие (см. левую часть рисунка 48). Затем линии тока, сгруппировавшись, формируют за счёт инерции струю воздуха со скоростью V_2 (см. правую часть рисунка 48).

Если бы струя попала в плавно расширяющийся канал (трубку Бернулли, рис. 43а), то могла бы плавно (и ламинарно) расширяться и затормозиться, создав фронт вентиляционного воздуха в бане. Но вырывающаяся из отверстия струя попадает в неподвижный воздух бани, «расталкивая» его. Такая струя называется затопленной. В затопленной струе развивается турбулентность: ламинарная приосевая часть струи (ядро) сужается и исчезает на расстоянии шести диаметров отверстия (шести калибров), а турбулентная периферическая часть расширяется за счёт вихрей (рис. 49). Осевая скорость струи падает обратно пропорционально расстоянию от отверстия. Так, струя с начальной скоростью 1 м/сек, истекающая из отверстия диаметром 10 см (расход струи 28 м³/час), на расстоянии 3 м имеет скорость 0,2 м/сек и диаметр 1,2 м (включающий 99,9% массового потока струи). Отметим, что масса струи по мере удаления от отверстия постоянно увеличивается за счёт эжекции (подсасывания неподвижного воздуха в струю в процессе образования движущихся вихрей). Если приточный воздух является холодным, то следует учитывать искривление траектории струи вниз к полу бани.



дует учитывать искривление траектории струи вниз к полу бани.

Рис. 49. Скорость турбулентной затопленной осесимметричной струи, истекающей из отверстия диаметром d_0 со скоростью V_0 . Внизу – график уменьшения скорости движения воздуха на оси струи по мере удаления от отверстия, построенный по формуле $V_x = V_0(6,1d_0/x) \exp(-74,5y^2/x^2)$.

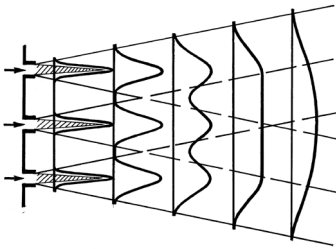


Рис. 50. Схема слияния отдельных струй в единый фронт движущегося воздуха

При наличии нескольких отверстий отдельные струи постепенно по мере удаления сливаются и дают единую широкую струю, имитирующую фронт ветра (рис. 50).

С учётом вышеизложенного могут реализоваться два противоположных типа вентиляции: либо через множество мелких отверстий (то есть через пористые или мелкощелевые стены), либо через отдельные локальные отверстия в воздухопроницаемых стенах (то есть через воздухозаборы, продухи, окна, форточки, двери). В первом случае многочисленные мелкие струи сливаются в единый фронт движения воздуха (рис. 51а), а во втором – формируются развитые турбулентные струи, перемешивающие весь воздух в помещении (рис. 51б). Первый случай обычно отождествляют с вытеснительной схемой вентиляции, а второй – со смесительной схемой.

В смесительной схеме вентиляции (рис. 51б) приточный воздух интенсивно перемешивается с воздухом бани либо в турбулентных зонах струи, либо принудительно дополнительными вентиляторами или циркуляцией воздуха от печи. В результате в вытяжное отверстие поступает не тот загрязнённый воздух, что есть в бане, а смесь загрязнённого воздуха с только что поступившим чистым приточным воздухом. Как нетрудно подсчитать, концентрация загрязняющей примеси (нежелательной или желательной) в воздухе бани в этом случае равна $d = G_3 / (G_B + G_3)$, где G_3 – скорость выделения загрязняющей примеси в бане, G_B – скорость ввода чистого вентиляционного воздуха в баню. Отсюда следует, в частности, что высокие концентрации примеси в виде водяного пара в воздухе бани (то есть высокие абсолютные влажности воздуха) в смесительной схеме возможны лишь в случае малых скоростей вентиляции, как в русских паровых банях, или при большой скорости подачи пара, как в высокоциркуляционных паровых саунах в сауна-спорте.

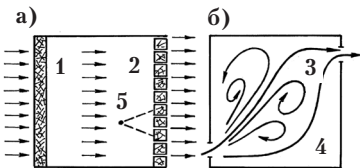


Рис. 51. Смесительный (а) и вытеснительный (б) принципы вентиляции. 1 и 2 – воздухопроницаемые стены, 1 – пористая воздухопроницаемая стена (например, утеплитель из минеральной ваты), 2 – стена со множеством щелей (например, брёвна с плохо проконопаченными швами), 3 – высокотурбулентная струя, 4 – сквозняк, 5 – зона локального загрязнения от точечного источника (вид сверху и сбоку).

1 – пористая воздухопроницаемая стена (например, утеплитель из минеральной ваты), 2 – стена со множеством щелей (например, брёвна с плохо проконопаченными швами), 3 – высокотурбулентная струя, 4 – сквозняк, 5 – зона локального загрязнения от точечного источника (вид сверху и сбоку).

В вытеснительной схеме (рис. 51а) приточный воздух поршнем выдавливает весь внутренний загрязнённый воздух в сторону вытяжного отверстия (или вытяжной воздухопроницаемой стены). Воздух движется единым фронтом от одной стены к другой без перемешиваний воздуха, причём движется через точки выделения примесей (вредных и нежелательных факторов или, наоборот, полезных и желательных). При этом возникают лишь локальные области загрязнений, например, в виде расширяющейся струи, как это имеет место при выбросе дыма из дымовой трубы в движущийся воздух (ветер). Ясно, что в некоторых зонах воздух может сохраняться чистым, но зато в других зонах 5 концентрации примесей будут повышенными. Именно этот режим наиболее удобен для парения веником: человек, располагаясь в комфортной неустойчивой обстановке, лишь эпизодически при возникновении желания может направить на себя веником поток воздуха из высоковлажной зоны 5 (или может переместиться всем телом в зону высоковлажного воздуха). При правильном размещении загрязняющих источников эффективность вытеснительной схемы в гражданском строительстве может оказаться в 5–10 раз более высокой, чем в смешительной, а в отдельных областях индустрии (микроэлектронике, микробиологии, медицине и т. п.) в сотни и тысячи раз выше. Более подробно с бытовой концепцией вытеснительной вентиляции можно познакомиться в книге Р.Н. Яковлева «Новые методы строительства», М.: Аделант, 2003 г. с одним лишь замечанием, что хорошие избы «дышат» (вопреки мнению автора) отнюдь не за счёт воздухопроницаемости бревенчатых стен, а за счёт паропроницаемости и гигроскопичности древесины.

В литературе очень часто утверждается, что русская бревенчатая баня, мол, очень комфортна именно за счёт проветривания через «дышащие» брёвна стен, и поэтому «пар» в ней «лёгкий». К сожалению, ни древесина, ни тщательно проконопаченные пазы (швы) не пропускают воздух в заметном количестве. «Лёгкость пара» в бревенчатых банях обусловлена, как уже отмечалось, совсем другим – осушкой горячего воздуха гигроскопичной древесиной. Но щели в полах бани и щели в плохопроконопаченных стенах действительно могут обеспечить вытеснительную «вентиляцию». Однако, такой воздухообмен является нерегулируемым и в ветренную погоду может полностью выстудить баню, не говоря уже о нежелательном образовании тумана.

Вытеснительная схема с высокой кратностью обмена называется в быту сквозняком, поскольку в этом случае приточный воздух как ветер проносится сквозь помещение. Очень часто, а в быту преимущественно, сквозняк сочетается с зонами смешения, то есть имеет место комбинированная схема. В то же время сквозняком может быть очень длинная

(дальнобойная) струя с минимальной турбулентностью. Устранение сквозняков достигается правильным выбором мест расположения вентиляционных отверстий (учитывающим и преимущественное направление ветра и иных воздушных потоков), уменьшением размеров вентиляционных отверстий для уменьшения дальнобойности струй, а также повышением турбулентности струй путём установки преград-завихрителей.

Высокая эффективность вытеснительной схемы вентиляции объясняет тот хорошо известный факт, что залповые проветривания помещения бани кратковременным открытием окон или дверей значительно чаще используются даже в моечных отделениях бань, чем проветривание через постоянно приоткрытую форточку. Отметим, кроме того, что залповые проветривания более комфортны в банях, чем постоянное проветривание, поскольку даже весьма умеренные, но длительно воздействующие воздушные потоки (0,1–0,3) м/сек, воспринимаемые лицом как лёгкая приятная свежесть, ощущаются затылком как неприятный сквозняк. Поэтому в банях в любом случае необходимо делать так, чтобы вентиляционный воздух дул в лицо.

В высокоциркуляционных саунах вытеснительная схема вентиляции невозможна, поскольку мощная циркуляция воздуха всё быстро перемешивает. В связи с этим напомним, что любая горячая (даже горизонтальная) поверхность создает над собой восходящий конвективный поток воздуха (рис. 52). Конвективная струя является турбулентной, причём ускоренной, поскольку тёплые струи (и горизонтальные, и вертикальные) в холодном воздухе всплывают, а холодные струи в тёплом воздухе тонут. Расчёт свободноконвективной струи над компактным тепловым источником мощностью $W=20\text{кВт}$ (например, над нагретой чугунной печной плитой) показывает, что на высоте 1 м над источником скорость струи достигает 4 м/сек при температуре до 200°C (И.В. Полушкин и др., Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха, часть 1, СПб.: Профессия, 2002 г.).

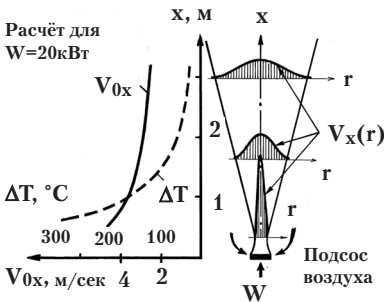


Рис. 52. Структура конвективной турбулентной струи, создающейся над локальным тепловым источником мощностью $W=20\text{кВт}$. Расчётные формулы:

$$\Delta T(^{\circ}\text{C})=24.5[W^2(\text{кВт})/x^5(\text{м})]^{1/3},$$

$V_{0x}(\text{м/сек})=1.33[W(\text{кВт})/x(\text{м})]^{1/3}$, где ΔT – превышение температуры воздуха в струе над температурой подсосываемого из помещения воздуха, $V_x(r)$ – продольная составляющая скорости, в том числе $V_{0x}=V_x(0)$ на оси струи.

Другой особенностью высокоциркуляционных саун является мощный забор воздуха печью на горение дров (до 100 м³/час и более). При этом надо иметь в виду, что на воздухозаборных отверстиях печи развиваются гравитационные перепады давления воздуха до (20–30) Па, намного большие гравитационных перепадов давления воздуха в самой бане (2–5)Па. Поэтому естественная вентиляция в бане (в отличие от принудительной) не может повлиять на работоспособность печи и на её засасывающую способность.

Даже простейший анализ вентиляционных потоков зачастую может вызвать затруднения. Многие авторы «рисуют» их «как попало», располагая, например, приточные отверстия выше вытяжных, что возможно, да и то в неустойчивом режиме, лишь в случае наличия высоких горячих вытяжных труб (это становится ясным, если вспомнить внутритопочные процессы в печах). В самом общем случае первичный анализ потоков надо вести в предположении ламинарности течений, разделив их на циркуляционные (внутренние) потоки с замкнутыми (круговыми) траекториями и на вентиляционные (проточные) потоки, замыкающиеся вне помещения. Каждую из возможных траекторий необходимо проверить на достоверность, убеждаясь в меньшем весе колена (правого или левого) восходящих газов. Окончательный вид течений определяется суммированием (суперпозицией) циркуляционного и вентиляционного потоков.

Траектория на рисунке 53а рекомендуется финскими производителями сухих циркуляционных саун: воздух подаётся под металлическую печь, частично идёт в топливник (при использовании печи на дровах), частично нагревается в калорифере печи и в виде горячей конвективной струи устремляется вверх и выходит наружу через вентотверстие в потолке или в верхней части стены, противоположной печи. В этой заведомо надёжной схеме (типа «фена») обеспечивается отсутствие холодных сквозняков по полу, и даже возможен вывод воздуха под полками и даже через щели в полу. Но в квартирных встроенных саунах подвести воздух под печь бывает технически трудно. Поэтому финнами рекомендуется для простейших бань ввод приточного воздуха через отверстие в стене на расстоянии 500 мм над печью (рис. 53б). Такое решение отчасти напоминает распространённую схему расположения батарей отопления под окнами: холодный приточный воздух сначала «падает» вниз, а затем «подхватывается» восходящими потоками вверх к верхнему вытяжному отверстию. На рисунках 53а и 53б очистка воздуха осуществляется подмешиванием чистого приточного воздуха к загрязнённому циркуляционному с последующим выводом части циркуляционного воздуха (то есть по смесительной схеме). Но это не означает, что воздух можно вывести из любой точки циркуляционного потока. Так, если в схеме 53б вытяжное

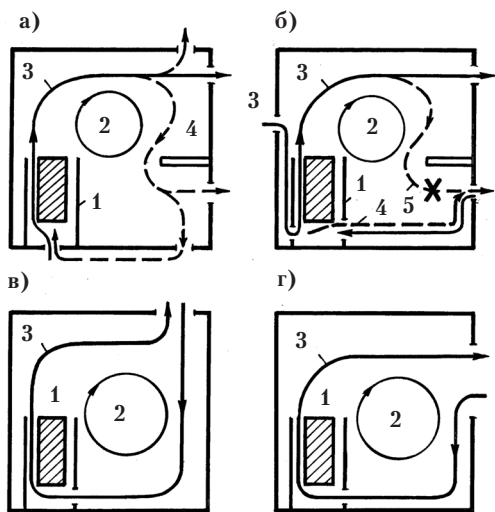


Рис. 53. Схема естественных гравитационных вентиляционных потоков в бане с экранированной металлической печью: а – подвод приточного воздуха под печь (в том числе и с экранами, не имеющими внизу заборов воздуха из помещения), б – подвод приточного воздуха в отверстие над печью, в и г – общеобменная вентиляция за счёт проёма в потолке (фонаря) или в стене (окна). 1 – печь калориферная, 2 – циркуляционный поток воздуха от печи, 3 – вентиляционная траектория, 4 – возможная вентиляционная траектория, 5 – невозможная вентиляционная траектория.

отверстие «волевым решением» опустить под полку, при малейшем нарушении режима (при «дуновении ветра») неустойчивые течения воздуха «опрокидываются»: отверстия под полкой становятся приточными (при отсутствии дополнительной тяги), а отверстия над печью – вытяжными.

При проветривании тёплых помещений через протяжённые по высоте проёмы окон и дверей (рис 53г) возникают приточный и вытяжной потоки одновременно, которые в состоянии при определённых условиях даже разомкнуть циркуляционную траекторию и превратить её в чисто вентиляционную. Большой интерес представляет расположение проёма в потолке (в виде фонаря, продуха), обеспечивающее наличие вентиляции в тёплых замкнутых объёмах воздуха (рис 53в), например, в погребах, шахтах, колодцах зимой, а также в печах при догорании углей при закрытых воздухозаборных отверстиях (прикрытом поддувале).

Определённую специфику имеет вентиляция встроенных бань. Также как и в ваннных комнатах, вытяжная вентиляция из бань кратностью не менее 1 раза в час должна выводиться на улицу, например, через существующие вентиляционные стояки здания. Но для упрощения возможен выброс вытяжного воздуха и в жилое помещение, если в нём имеется общеобменная вентиляция, например, выброс воздуха из минисауны может осуществляться в ванную комнату, где уже есть вентиляция. Воздух сухой сауны имеет низкую абсолютную влажность, а поэтому сложностей с выбросом нет. Но если используются влажные, а тем более паровые режимы, то необходимо снижать абсолютную влажность вытяжного воздуха до $0,017 \text{ кг/м}^3$ и ниже, чтобы предотвратить увлажнение помещения.

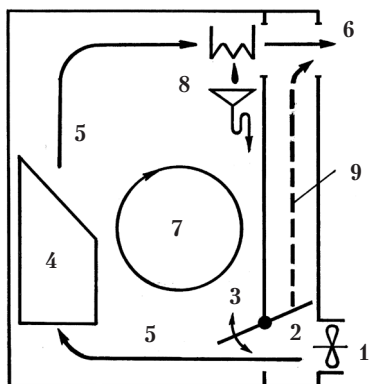


Рис. 54. Схема механической вентиляции квартирной встроенной бани (сауны), работающей как в сухом режиме, так и в паровом. 1 – вентилятор приточный, 2 – приточное отверстие, 3 – двухходовой клапан (вертикальное положение – разбавление вытяжного воздуха при паровом режиме, горизонтальное положение – подача вентиляционного воздуха в баню при сухом режиме), 4 – металлическая печь (электрическая), 5 – вентиляционный поток, 6 – вытяжное отверстие, 7 – циркуляционный поток, 8 – осушитель воздуха (конденсатор на холодном змеевике), 9 – поток сухого «приточного» воздуха, «вентилирующий» (разбавляющий) высоковлажный вытяжной воздух из бани, работающей

в паровом (влажном) режиме. Вытяжной воздух из отверстия 6 допустимо направлять в существующий вентиляционный стояк здания лишь при достаточности тяги во избежание задува пара в соседние квартиры.

Это можно осуществить либо осушением вытяжного воздуха (например, конденсацией паров воды на холодных змеевиках, пластинах, трубах), либо разбавлением вытяжного воздуха потоком сухого воздуха. Иными словами, во встроенных в квартиру влажных саунах желательно делать вентиляционную систему двойного назначения:

- в сухом режиме действует многократная (например, шестикратная) вентиляция, обеспечивающая сухость воздуха в сауне и сухость вытяжного воздуха;

- в недолговременных влажном и паровом режимах кратность вентиляции временно снижается, например, до одного раза в час и менее, но начинает «вентилироваться» (например, шестикратно разбавляться) вытяжной воздух так, чтобы в результате в жилые помещения не попали воздушные потоки влажностью более $0,017 \text{ кг/м}^3$.

Это можно обеспечить схемой с приточным вентилятором и двухходовым клапаном (рис. 54). Схему можно дополнить конденсационным осушителем вытяжного воздуха (по аналогии с известным химическим аппаратом с обратным холодильником – перегонным кубом).

4.2. Консервирующая вентиляция

Консервирующей вентиляцией будем называть просушку бани после завершения водных процедур. Если в ваннах и душевых комнатах основную сложность представляет сушка полотенец и напольных ковриков,

то в банях традиционного типа наиболее трудно сушить древесину на полах, особенно в щелях.

4.2.1. Принцип нормализации

Если рассматривать проблему широко, то следует говорить не о сушке, а о нормализации бани. Дело в том, что во время процедуры в сухих высокотемпературных саунах древесина порой вовсе не намокает, а, наоборот, пересушивается, а при охлаждении после окончания банной процедуры, вновь увлажняется из-за гигроскопичности. В паровых и влажных банях намокшую древесину надо сушить тоже отнюдь не до абсолютно сухого состояния, а до определённого уровня влажности с учётом возможных вредных последствий (коробления, растрескивания, гниения и т. п.).

Действительно, представим себе, что сауна длительное время простаивает в «совсем сухом» состоянии в квартире с температурой 20°C и нормальной относительной влажностью воздуха 60% (то есть при абсолютной влажности воздуха $0,01 \text{ кг/м}^3$). В соответствии с рисунком 55 равновесная относительная влажность древесины в этих условиях составляет 12%. Теперь прогреем эту сауну без вентиляции и без увлажнения до температуры 70°C . Из этого же рисунка 55 видим, что нагретая до 70°C древесина влажностью 12% создаёт над собой абсолютную влажность воздуха $0,14 \text{ кг/м}^3$, а при такой влажности воздуха в бане в пору париться с веником! Баня из «сухой» вдруг превратилась в «паровую», хотя никто на каменку не подавал. Откуда в воздухе взялся пар? Древесина при повышении температуры стала сохнуть и увлажнила воздух. Кстати, именно выходящие из древесины водяные пары «тянут» за собой «запахи дерева», столь ценимые в квартирных саунах. Очень многие вещества начинают пахнуть только тогда, когда их увлажняют (а тем более увлажняют с нагревом). Объясняется это образованием азеотропов (комплексов с водой), имеющих пониженную температуру кипения (повышенные давления насыщенных паров). Так что, если вы хотите, чтобы ваша сауна из кедра благоухала, восхищая гостей, смочите потолок сауны водой.

Но чаще ни запахи, ни повышенная влажность в квартирных саунах не нужны. Поэтому сауны при прогреве (или после прогрева) вентилируют «свежим» воздухом из квартиры, имеющим абсолютную влажность $0,01 \text{ кг/м}^3$. В результате при температуре воздуха в сауне 70°C и абсолютной влажности воздуха $0,01 \text{ кг/м}^3$ древесина сауны рано или поздно может высохнуть до относительной влажности древесины 2% (см. рис. 55), отдав в воздух квартиры весьма большое количество воды. Так, при мас-

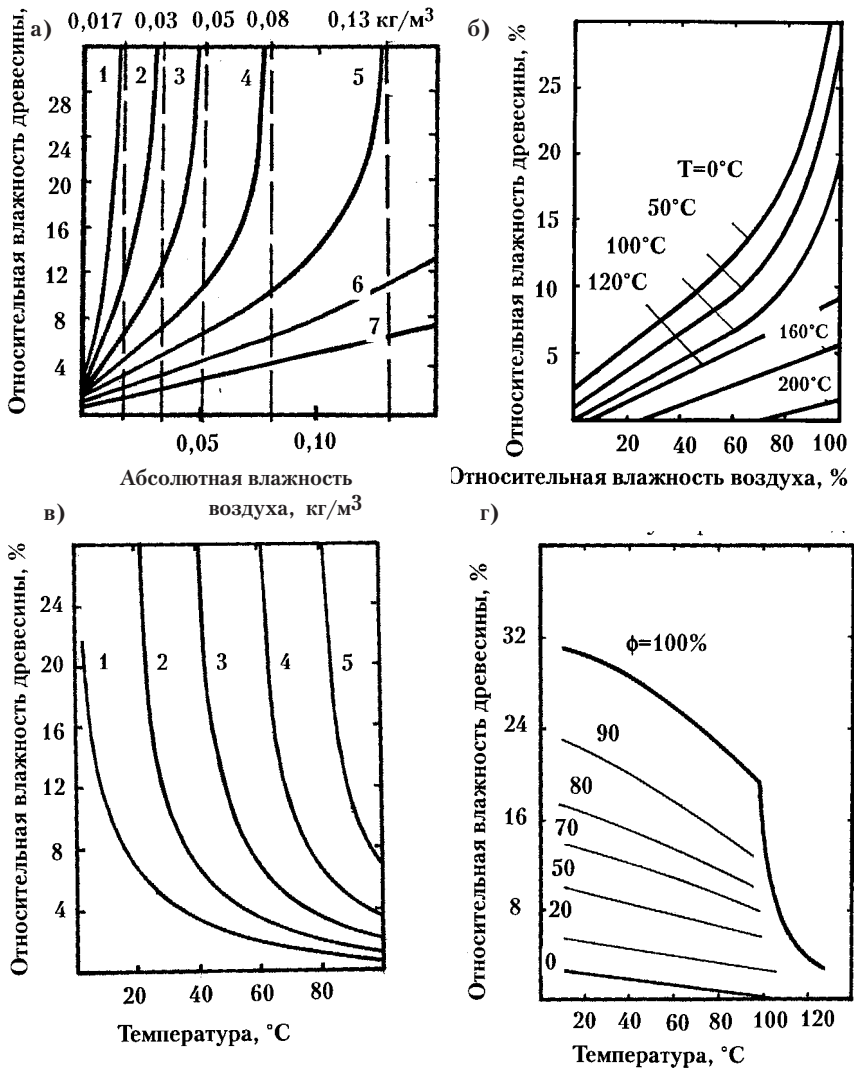


Рис. 55. Зависимость равновесной относительной влажности древесины от температуры и влажности воздуха: а – цифры у кривых соответствуют различным температурам 1 – 20°C, 2 – 30°C, 3 – 40°C, 4 – 50°C, 5 – 60°C, 6 – 70°C, 7 – 80°C; б – цифрами у кривых указаны значения температуры; в – цифры у кривых соответствуют различным абсолютным влажностям воздуха: 1 – 0,005 кг/м³, 2 – 0,017 кг/м³, 3 – 0,05 кг/м³, 4 – 0,13 кг/м³, 5 – 0,29 кг/м³; г – цифрами у кривых указаны значения относительной влажности воздуха. Относительная влажность древесины равна отношению массы воды в древесине к массе древесины в абсолютно сухом состоянии.

се обшивки потолка и верхних частей стен всего 50 кг может выделиться 5 кг водяных паров, что обеспечит хомотермальный режим (банный) во всём объёме однокомнатной квартиры! Ясно, что при этом совершенно необходимо вентилировать целиком всю квартиру. Потом древесина, охладившись, начнёт увлажняться, осушая воздух в квартире. К счастью для производителей саун, влажность древесины изменяется медленно и редко когда достигает равновесных значений. А вот рассыхание и коробление обшивки сауны дело привычное.

При нормализации бани надо чётко понимать цель операции. Ясно, что летом совершенно необходимо в первую очередь сушить полы, чтобы не сгнили. С другой стороны также ясно, что мокрые протекающие полы высушить (до влажности древесины в щелях ниже 18%) невозможно даже за сутки. Так что без водоотталкивающей и антисептической обработки не обойтись даже в случае съёмных полов, которые можно вынести для просушки на солнце. А вот зимой, когда процессы гниения крайне замедленны или полностью заторможены, полы можно специально не сушить вовсе, но провести уборку и устранить излишнюю внешнюю воду (лужи) для предотвращения образования наледей (которые, впрочем, высохнут при последующей очередной протопке бани). В то же время известно, что древесина с очень высокой влажностью (более 100%) и летом гниёт крайне медленно из-за угнетения деятельности грибов при высоких влажностях. Всем известно, что в болотах грибы не растут. Также известно, что деревянные сваи в воде сохраняются много лучше, чем над водой (город Венеция уже веками стоит на деревянных сваях). Во многих городах деревянные мостовые, уложенные поленьями вертикально, служили годами и сгнивали лишь в тёплые периоды года при подсушивании. Поэтому и вечно сырые брёвна в глиняном полу чёрных бань гнили медленно. К сожалению, сырые деревянные полы в банях крайне антигигиеничны и малопригодны в современных условиях.

Так или иначе, консервирующая общеобменная вентиляция может мыслиться лишь как часть более общей процедуры нормализации бани и должна неминуемо сочетаться с иными мероприятиями (например, уборкой, антисептической обработкой и т. п.), также направленными на предотвращение гниения, запахов, ухудшения внешнего вида (загрязнения, коробления, рассыхания и т. п.) и общесанитарного состояния. Действительно, трудно ожидать сколько-нибудь значительной эффективности сушки банного пола, если он завален листьями от веников вперемежку с хлопьями мыльных загрязнений. В связи с этим, напомним, что даже «чистая» питьевая вода при испарении выделяет до 0,5 г/л сухого остатка, который постепенно накапливается на деревянных деталях в виде «водного камня» типа «накипи». Если же в бане используется мы-

ло (натриевая соль жирных кислот) и недостаточно мягкая вода, то при мытье образуются липкие нерастворимые в воде кальцевые и магниевые мыла в виде белых творожистых хлопьев, забивающихся в щели. На этих хлопьях осаждаются также липкие жировые остатки с тела, так что в результате уже через год эксплуатации протекающий пол в щелях превращается в никогда не просыхающую «слизь», источник антисанитарии и гниения.

4.2.2. Механизм испарения воды

Исходным моментом (первичным актом) испарения является явление газификации воды (парообразование). При этом вода, разлитая по эмалированной поверхности душевого поддона, или вода, впитавшаяся вглубь древесины, газифицируется точно так же, как вода, налитая в ванну или распределённая на коже человека. Наиболее быстрые молекулы воды, преодолевая энергетический барьер, равный скрытой теплоте испарения (конденсации) 539 ккал/кг, вылетают с поверхности компактной (жидкой) воды и могут безвозвратно удалиться (например, в вакууме), если их не заставят возвратиться назад в жидкость столкновения с молекулами в газовой фазе (рис. 56а). Массовые скорости газификации воды могут быть очень большими – несколько килограммов в секунду с 1 м² при температуре 40°C (то есть тонны воды в час с 1 м² поверхности!) и возрастают с температурой экспоненциально (точнее, пропорционально $d_0(T)^{1/2}$). Вместе с тем, давление водяных паров p_n (а по существу концентрация молекул воды) у поверхности воды крайне мало, поскольку все молекулы воды тут же улетают от поверхности. При высоких скоростях газификации компактная вода, естественно, сильно охлаждается, поскольку из неё вылетают наиболее энергичные молекулы, и средняя энергия оставшихся молекул в воде (как раз и характеризующаяся понятием температуры) уменьшается. Это явление хорошо известно и широко используется, например, при сублимационной сушке, когда вода из-за охлаждения превращается в лёд.

Если же газификация происходит в воздушной среде (именно этот случай реализуется в банях), то требуется учёт обратного процесса – ожижения паров воды, поступающих из воздуха на поверхность компактной воды. То есть молекулы воды из воздуха (представляющие собой водяной пар в воздухе) «влетают» в поверхность воды и «застревают» там в результате «прилипания» к другим молекулам воды, находящимся в «слипшемся» (жидком) состоянии за счёт действия межмолекулярных сил. В результате процесс газификации-ожижения усложняется: вылетающие молекулы воды начинают сталкиваться с молекулами воздуха, ску-

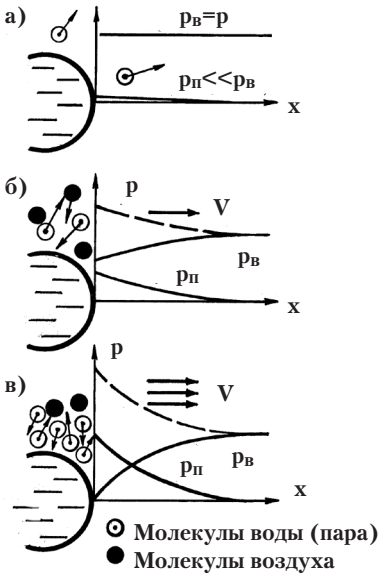


Рис. 56. Режимы испарения с поверхности чистой воды: а – кинетический режим, при котором скорость испарения равна скорости газификации, б – диффузионный режим, при котором скорость испарения определяется скоростью диффузии молекул воды в воздухе, в – режим кипения (факельный режим), при котором пары воды удаляются газодинамически (поток – струей пара). p_n – парциальное давление паров воды, p_v – давление воздуха (сухой части), p – суммарное давление воздуха и водяных паров, V – перенос масс воздуха с водяными парами (ветер).

чиваются вблизи поверхности воды, «влетают» в неё и при некоторой концентрации молекул воды в воздухе получается баланс – сколько молекул воды газифицируется, столько же молекул и ожижается. Иными словами, давление паров воды в воздухе у поверхности воды (или абсолютная влажность воздуха) равно равновесному (или плотности насыщенного пара), и процессы газификации и ожижения взаимно уравнивают друг друга (рис. 56б). Но если вдали от поверхности воды давление водяных паров в воздухе понижается (например, вследствие вентиляции), то в воздушной зоне возникает перепад концентрации водяных паров, а молекулы воды начинают диффундировать в среде молекул воздуха от поверхности воды – наступает дисбаланс. Этот дисбаланс в реальных условиях бани очень мал: если в целом в бане газифицируются (тогда ожижаясь) тонны воды в час, то уходят в результате диффузии лишь граммы или сотни грамм водяных паров в час. Результирующий эффект дисбаланса между газификацией и ожижением называется испарением (если количество компактной воды убывает) или конденсацией (если количество воды возрастает за счёт ожижения водяных паров).

Таким образом, можно отметить два предельных характерных режима сушки. Во-первых, если плотность воздуха, препятствующего движению молекул воды, мала, то скорость испарения близка к скорости газификации (рис. 56а). Этот режим называется кинетическим. Он реализуется не только при очень быстрой вакуумной сублимационной сушке, но и при очень медленной сушке в том случае, если скорость газификации очень мала по сравнению со скоростью диффузии, например, в случае газифи-

кации высококипящих масел. В этом режиме давление паров воды у поверхности воды очень мало (практически равно нулю). Во-вторых, если воздух уже оказывает существенное противодействие перемещающимся молекулам воды, реализуется так называемый диффузионный режим испарения (или конденсации). В этом режиме давление паров воды у поверхности воды близко к равновесному. Если вдали от поверхности воды давление водяных паров в воздухе отличается от равновесного, то возникает диффузионный поток паров воды в воздухе (рис. 56б). Процессы испарения воды с кожи человека как раз и являются диффузионными, а хомотермальный режим является частным случаем диффузионного режима в условиях полного отсутствия перепадов давления водяных паров в воздухе и, соответственно, полного отсутствия потоков водяных паров (отсутствия испарений и конденсаций).

Таким образом, увеличить скорость испарения воды в диффузионном режиме можно увеличив температуру воды или тел, содержащих внутри себя или на своей поверхности воду (и тем самым увеличив давление паров воды у сохнувшей поверхности) и/или снизив давление паров воды в воздухе. Температура воздуха в бане на скорость испарения воды (и на скорость сушки) не влияет. Увеличить скорость сушки, кроме того, можно ещё в большей степени, организовав обдув поверхности потоком осушённого воздуха, поскольку при этом потоком сухого воздуха «сдуваются» от поверхности воды те молекулы воды, которые раньше конденсировались.

При всей своей очевидности, сделанные выводы могут стать неожиданными для многих дачников, предполагающих, что полы лучше всего сушить горячим банным воздухом, увлекаемым принудительной вентиляцией в подполье. Но мы ведь уже неоднократно отмечали, что воздух в бане у полов охлаждается и осушается, то есть, нагревая полы, банный воздух в то же время увлажняет их. Воздух из бани (даже как бы «сухой») никогда нельзя выводить в подполье во избежание дополнительного увлажнения полов.

Всё дело в том, что для эффективной сушки нужно иметь горячие поверхности полов, а не любой горячий воздух. Конечно, горячий воздух греет полы, но пока они нагреваются, они будут увлажняться, если точка росы горячего воздуха выше температуры полов. Ещё более важным фактором для эффективной сушки является низкая абсолютная влажность воздуха, а она достигается именно при низкой температуре воздуха. Само собой разумеется, полы в этом случае охлаждаются (как за счёт испарения воды, так и за счёт низкой температуры воздуха) и их надо греть, например, инфракрасным излучением от печи. С горячей поверхности вода испаряется даже в очень холодный воздух: только при этом испа-

рившаяся вода может затем конденсироваться в туман с эффектом появления «клубов пара» вокруг поверхности. Конечно же, самым идеальным случаем была бы сушка полов в горячем состоянии горячим сухим воздухом, что может быть достигнуто применением специальных тепловоздуховок (фенов) и забором воздуха с улицы.

Для специалистов может представлять интерес анализ процессов сушки с помощью конденсационных кривых – теоретических зависимостей относительных влажностей воздуха от температуры воздуха при фиксированных абсолютных влажностях воздуха (то есть при фиксированных точках росы). Эти конденсационные кривые – полный аналог хомотермальной кривой, но построенные для других точек росы. Так, например, построив конденсационные кривые для точек росы 20 и 40°C (отвечающим характерным температурам пола и полка соответственно), легко видеть, что банный воздух с температурой 40°C и относительной влажностью 60% сушит пол, но увлажняет пол (рис. 57). Это значит, что при сушке бани надо поддерживать повышенную температуру именно пола, а не просто всей бани в целом.

Механизм испарения воды изменяется, если на поверхности воды находится плёнка плохо растворимой (например, жировой) примеси. Плохая растворимость воды в жире означает, что давление насыщенных паров воды над жировой плёнкой мало. Лишь очень немногие молекулы воды, «выскочившие» из воды, способны пройти через жировую плёнку, а затем и газифицироваться. Режим испарения становится кинетическим, поскольку скорость испарения определяется скоростью газифика-

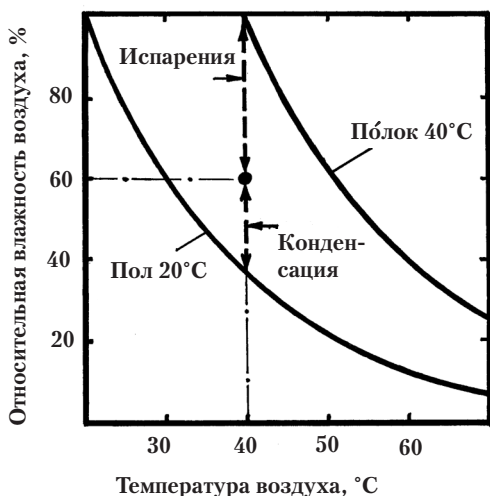


Рис. 57. Теоретические зависимости относительной влажности воздуха от температуры воздуха при фиксированных абсолютных влажностях воздуха (то есть при фиксированных точках росы), называемые конденсационными кривыми. Построены для точек росы 20°C и 40°C и характеризуют, в частности, пол с температурой 20°C и полка с температурой 40°C. Если метеоточка воздуха (например, 40°C и относительная влажность 60%) находится ниже кривой, то воздух сушит, а если выше – увлажняет.

ции. Характерной чертой кинетического режима является то, что скорость испарения не зависит ни от влажности воздуха, ни от скорости обдува. Всем известно, что пережиренная грязная кожа очень плохо испаряет пот даже в сухом воздухе, обдувающим тело, но стоит только намочить грязную вспотевшую кожу водой, человек тотчас почувствует повышенное охлаждение тела за счёт испарения искусственно нанесённой чистой воды. Точно также плохо испаряется вода с засаленных банных листьев и белёсых хлопьев нерастворимых мыл.

Но испарить воду, конечно же, можно при сколь угодно толстой плёнке нерастворимой примеси. Для этого надо нагреть воду до температуры кипения. В таком случае давление пара возрастает до атмосферного (и выше) и просто «прорвёт» плёнку примеси точно так, как «пробулькивает» пар в кастрюле через слой жира на поверхности супа (рис. 56в). Отметим при этом, что парциальное давление воздуха p_v (равное давлению в бане за минусом давления водяных паров) у поверхности воды уменьшается, вследствие чего неминуемо возникает диффузионный поток молекул воздуха к поверхности, повышающий общее давление p у поверхности. В результате возникает «ветер», обозначенный на рисунках 56б и 56в стрелками с индексом V, дующий от поверхности и уносящий диффундирующие молекулы воздуха (а вместе с ними и пары воды) от поверхности воды. Этот «ветер» можно увидеть по движению (колебанию) тумана над «парящей» поверхностью воды.

Кстати, забегая вперёд, отметим, что поступление кислорода к тлеющим дровам в печи происходит именно в диффузионном режиме. Если подуть на тлеющие дрова, то скорость испарения летучих из дров увеличивается, и возникает пламя (факел), представляющее собой ветер-поток летучих, сгорающих в диффундирующем к поверхности дров воздухе (см. раздел 5.6). Именно этот «ветер», дующий от поверхности дров, и «спасает» древесину от немедленного перегрева и «взрывного» разрушения в раскалённой печи, даёт возможность дровам сгорать постепенно. В любом случае испарение (будь то испарение воды или испарение летучих веществ из нагретой древесины) охлаждает поверхность, вследствие чего для поддержания испарения необходим постоянный подвод тепла к поверхности.

Ярко выраженные потоки влажного воздуха при сушке могут иметь место в банях лишь на горячих специально увлажняемых потолках саун, а также на раскалённых камнях каменки при поддаче на них воды. При больших скоростях испарения воды на камнях (при «сушке» мокрых раскалённых камней) скорость ветра приближается или даже начинает превосходить скорость звука, вследствие чего возникает знаменитый звук – хлопок при поддаче.

4.2.3. Сушка древесины

Древесина является пористым материалом, а вследствие открытости пор способна (при отсутствии водоотталкивающей обработки) впитывать воду, поглощать влагу из воздуха и пропускать через себя водяной пар и воздух (см. раздел 3). Если древесина может увлажняться как компактной водой, так и водяным паром, то высушиваться (в отличие от непористых поверхностей) она может только путём удаления из неё водяных паров.

Процесс высушивания древесины происходит в несколько стадий. Сначала испаряется вода на поверхности древесины, потом испаряется свободная вода в крупных капиллярах межклеточных и внутриклеточных пространствах, затем испаряется вода в мелких капиллярах клеточных стенок. Испарение в мелких капиллярах связано с гигроскопичностью и может контролироваться лишь в условиях постоянно отапливаемых помещений. Поэтому для консервирующей вентиляции особенно актуально высушивание поверхности древесины и крупных капилляров, отвечающих за увлажнение древесины на уровне относительной влажности (25–100)%.

Вода, заполняющая поры, испаряется в диффузионном режиме, причём диффузия паров воды крайне затруднена, но не только столкновениями с молекулами воздуха, а извилистостью и большой длиной капилляров. Хотя древесина содержит 50–90% пустот, извилистость пор приводит к тому, что реальный путь удаляющихся молекул воды может в десятки раз превышать характерные размеры (толщину) изделия (доски). Так, если паропроницаемость воздуха составляет 0,6 мг/м·час·Па, то паропроницаемость древесины равна 0,06 мг/м·час·Па поперёк волокон и 0,3 мг/м·час·Па вдоль волокон. Это значит, что вода из древесины будет удаляться долго, и исчезновение компактной воды с поверхности древесины фактически означает лишь начало сушки.

4.2.4. Сушка поверхностей

Сушка мокрых поверхностей по сути эквивалентна процессу испарения с поверхности компактной воды. Учитывая, что тепловой поток $q_{\text{исп}}$, связанный с испарением или конденсацией, равен скорости испарения (конденсации), умноженной на теплоту испарения, нетрудно получить выражение для скорости испарения воды со свободной поверхности $G_{\text{п}}(\text{мг}/\text{м}^2 \cdot \text{час}) = (159 + 297 \cdot V) \Delta p_{\text{п}}$, где V – скорость движения воздуха в м/сек, $\Delta p_{\text{п}}$ – перепад парциального давления водяных паров в Па, равный разности парциальных давлений водяных паров непосредственно

у мокрой поверхности и в воздухе бани. С другой стороны $G_{\text{п}}(\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{час})=0,6\Delta p_{\text{п}}/\delta$, где $0,6 \text{ мг}/\text{м}^2\cdot\text{час}$ – паропроницаемость воздуха, $\delta(\text{м})$ – толщина пограничного слоя, то есть характерное расстояние, на котором реализуется перепад парциального давления $\Delta p_{\text{п}}$ вблизи поверхности. Сопоставляя эти соотношения, можно заключить, что толщина пограничного слоя в отсутствие движений воздуха составляет 4 мм, а при скорости движения воздуха 1 м/сек сокращается до 1,3 мм. Иными словами, когда мы говорили в предыдущем разделе о «сдуве» с поверхности воды газифицировавшихся молекул воды потоком обдувающего воздуха, то фактически имели в виду, что сухой воздух при обдуве мокрой поверхности (в том числе и кожи, и пола) всё больше «приближается» к поверхности испарения с увеличением скорости обдува. Это значит, что в зазорах (щелях, полостях) толщиной менее 4 мм сушка поверхности будет усложнена.

Приведённые толщины пограничного слоя, конечно же, весьма приблизительны и сильно зависят от методики расчёта. В этой книге для единообразия используются теоретические соотношения для тепловых потоков, принятые для расчёта бассейнов (см. БАНБАС, периодический журнал «Бани и бассейны», № 5(23), 2002, стр. 96), базирующиеся на некоторых экспериментальных константах. Более точные и сложные формулы можно найти в научно-технической литературе по теплообмену. Отметим однако, что все расчётные методики обладают большой погрешностью, поэтому на практике предпочитают экспериментальные исследования. В частности, расчёт теплообмена сталкивается с наибольшими трудностями (иногда непреодолимыми) именно в части нахождения месторасположения границ переноса тепла и массы у поверхности испаряющейся (и одновременно охлаждающейся) воды, то есть в части определения фактической величины δ .

Так или иначе, используемые соотношения для бассейнов экспериментально подтверждаются и свидетельствуют о значительной зависимости скорости испарения с поверхности воды от скорости движения воздуха в бане. В частности, в специализированной литературе (И.В. Кречетов. Сушка древесины, М.: Бриз, 2004 г.) предлагается формула для расчёта скорости испарения воды со свободной поверхности $G_{\text{п}}(\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{час})=(170+130\cdot V)\Delta p_{\text{п}}$ (где V в м/сек, $\Delta p_{\text{п}}$ в Па) при параллельном движении воздуха к испаряющейся поверхности и $G_{\text{п}}(\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{час})=(170+260\cdot V)\Delta p_{\text{п}}$ при перпендикулярном движении воздуха к испаряющейся водной поверхности (то есть при набегающем ветре). Указанные соотношения очень близки к используемым нами.

Выражая соотношение скорости испарения $G_{\text{п}}$ через более привычные для понимания абсолютные влажности d ($\text{кг}/\text{м}^3$) получаем

$G_n(\text{кг/м}^2\cdot\text{час})=(22,4+41,8V)\Delta d$, где Δd (кг/м^3) – перепад абсолютных влажностей воздуха (разность абсолютных влажностей непосредственно у поверхности воды и в воздухе бани). Так, при температурах и полов и воздуха 20°C и относительной влажности воздуха в бане 50% перепад абсолютных влажностей составит $0,008 \text{ кг/м}^3$, а скорость испарения $(0,18+0,33V) \text{ кг/м}^2\cdot\text{час}$. Если, например, вода разлита по поверхности деревянного пола слоем 1 мм, то количество воды составит 1 кг на 1 м² пола. Вода при этом испариться за 5 часов при отсутствии движений воздуха и за 2 часа при скорости движения воздуха 1 м/сек. Испарение воды влечёт за собой охлаждение пола, и для поддержания температуры пола на уровне 20°C требуется нагрев пола (например, лучистым теплом) мощностью $0,12 \text{ кВт/м}^2$ при отсутствии движений воздуха и $0,34 \text{ кВт/м}^2$ при скорости воздуха у пола 1 м/сек.

Если же пол бани, имеющий температуру 20°C , обдувать горячим воздухом из бани с температурой 40°C и относительной влажностью 50%, то перепад абсолютных влажностей у пола и в воздухе бани составит всё те же $0,008 \text{ кг/м}^3$, но со знаком минус. То есть пол будет не сохнуть, а увлажняться со скоростью $0,51 \text{ кг/м}^3\cdot\text{час}$ при скорости движения воздуха 1 м/сек, что повлечёт за собой и нагрев пола мощностью $0,34 \text{ кВт/м}^2$. При ещё более высоких температурах обдувающего воздуха скорость увлажнения полов может быть ещё выше.

В целом ситуационная картина сушки мокрых поверхностей в бане (полов, стен, полков) абсолютно та же, что и при испарении воды с кожи человека с одним единственным (порой очень существенным) замечанием, что температура кожи человека не может изменяться в сколь угодно широких пределах.

4.2.5. Сушка пор

Теория сушки древесины в порах по И.В. Кречетову включает три самостоятельных механизма. Во-первых, при высоких влажностях древесины (более 100%), когда есть поры, полностью заполненные водой (влагой), свободная влага движется как вода в трубе под действием сил тяжести (в крупных капиллярах), перепадов давления (в том числе водяного пара при температурах выше 100°C). Фактически вода газифицируется на поверхности древесины, и её потери на поверхности компенсируются подтеканием воды из глубины пор. Древесину высокой влажности можно сушить в какой-то степени даже протираанием (промакиванием) её поверхности мягкой хлопчатобумажной тканью, впитывающей влагу из крупных пор древесины. Действительный механизм явления не вполне ясен, но известно, что скорость влагопроводности

в этом режиме очень велика. Во-вторых, при влажностях древесины 30–100% (представляющих наибольший интерес для полов бань) имеются поры полностью заполненные водой (ультракапилляры), а есть более крупные капилляры (размером более 1–10 нм), в которых вода лишь смачивает стенки каналов, а сам объём каналов заполнен воздухом, причём неподвижным. Поэтому открывается возможность газификации воды уже внутри древесины в воздух пор с последующей диффузией водяных паров в воздухе пор на поверхность древесины. Так что влага внутри древесины при этих влажностях может перемещаться за счёт капиллярных сил в ультракапиллярах, за счёт растекаемости воды по стенкам крупных пор, а также за счёт диффузии пара. В-третьих, при влажностях ниже 30% влага сохраняется лишь в стенках клеток (то есть в ультракапиллярах), а крупные поры (трахеиды) заполнены сплошь воздухом. В этом случае влага сочится из микрокапилляров в крупные поры, там газифицируется и удаляется диффузией в воздухе.

К механизмам сушки мы ещё вернёмся в последующем разделе 5.6.2. Пока лишь подчеркнём, что главным процессом при сушке древесины является движение молекул воды в воздухе древесных пор, точно такое же, как при рассматривавшемся раньше процессе прохождения водяного пара через строительные изолирующие конструкции. В таком случае скорость сушки пор древесины можно оценить по величине диффузионного потока пара через древесину $G_{\text{п}}(\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{час}) = 0,06 \Delta p / \delta = 8500 \Delta d / \delta$, где Δp (Па) – перепад парциальных давлений водяных паров в воздухе древесины, Δd (кг/м³) – перепад абсолютных влажностей воздуха в древесине, δ (м) – характерный размер деревянного изделия (например, толщина доски). Так, при температуре полов и воздуха в бане 20°С и относительной влажности воздуха в бане 50% перепад абсолютной влажности равен 0,008 кг/м³. При толщине досок пола бани 40 мм скорость сушки древесины в порах будет равна приблизительно 1,7 г/м²·час, то есть вода из пор столь толстого слоя древесины испаряется в 100 раз медленнее, чем с поверхности. В то же время древесина способна содержать много воды, в частности, до 2 кг/м² даже при незначительном увлажнении полов с повышением относительной влажности древесины с 30% всего лишь до 40% (при массе полов 20 кг/м²). Это значит, что пол в рассматриваемых условиях будет сохнуть не менее 1000 часов (около месяца). Если доски будут иметь толщину 25 мм и будут сохнуть с обеих сторон, то продолжительность сушки снизится до 10–15 дней, что согласуется с данными по сушке древесины в штабелях (см. раздел 5.6.2).

Так что дачник, увидев, что вода на полах бани через 2–3 часа исчезла и доски стали вроде бы «сухими», должен понимать, что в действительности сушка (для предотвращения гниения) будет продолжаться, не пре-

кращаясь, фактически вплоть до следующей протопки бани. Визуально отличить в бане сухую древесину пола с влажностью 10% от увлажнённой до влажности 30–50% практически невозможно.

4.2.6. Сушка в полостях

В наиболее неблагоприятных условиях находятся массивные деревянные изделия (балки, лаги, столбы, стропила и т. п.), расположенные в плохопроветриваемых условиях. Например, проблемы в банях возникают с балками протекающих полов. Если в элитных представительских банях вопрос с сушкой подполья можно решить с помощью электровоздухонагревателей, то в рядовых любительских банях единственным фактором эффективного высушивания остаётся продуваемость подполья наружным атмосферным воздухом. И именно в этом вопросе дачники чаще всего делают упущения, ошибочно считая, что главное в подполье – отвести воду, а продуваемость подполья – вредный фактор, выхолаживающий банные полы. В действительности же всё наоборот: если подполье свободно продувается, то вода на земле и мокрый грунт не представляют никакой угрозы конструкциям полового перекрытия бани.

Необходимое количество и размер вентиляционных отверстий в цоколе бани определяется скоростью ветра, на которую дачник повлиять не может. Поэтому вентотверстия необходимо делать как можно крупнее и располагать с наветренной и подветренной сторон так, чтобы сквозняки были максимальными. Если есть возможность (в первую очередь декоративная), то цокольную часть лучше вообще оставлять открытой ветру, а заборки (при необходимости) делать декоративными лишь со стороны входа в баню. Всё это в полной мере относится и к мокрым напольным решёткам: если нет возможности их нагревать и обдувать сухим воздухом, то их следует выносить на свежий ветер.

Протекающий пол – это, конечно, анахронизм, но в любительских банях, пожалуй, одно из ценнейших достоинств, поскольку ходить босиком по мокрому деревянному полу очень приятно, домовито и достойно. Поэтому любители бань порой вполне сознательно идут на столь недолговечное техническое решение. В древних банях бревенчатый (дощатый) пол прямо по глинистому грунту отнюдь не был самым ненадёжным элементом бани, в том числе и чёрных, поскольку при чрезмерной влажности древесины развитие грибов тоже затруднено. В древности преобладали увлажнения потолков и стен за счёт тривиальных протечек кровли, поскольку дешёвые качественные кровельные материалы (в первую очередь, толь и шифер) появились лишь в XX веке. Бревенчатые, тёсовые, драочные, соломенные, камышёвые и земляные крыши при неисправностях пропускали на пото-

лок и стены десятки литров дождевой воды, и говорить о какой-либо возможности регулярного (периодического) просушивания бани не приходилось. Как сейчас, так и тогда задача была простой – не допустить самих протечек, но если уж они случались, то стены должны были иметь возможность рано или поздно, но обязательно просохнуть. Как и во всех деревянных строениях это достигалось организацией продухов, зазоров и щелей, продуваемых наружным атмосферным воздухом. Фактически задача консервирующей сушки бань очень близка к проблеме сушки дров в поленицах и пиломатериалов в штабелях, также подвергающихся воздействию осадков. В сушильных производствах считают, что продолжительность сушки древесины пропорциональна $a^3/2$, где a – толщина материала при толщине прокладок (зазоров, продухов) 25–40 мм. Так что увлажняемые конструкции должны изготавливаться тонкими.

Продухи (для сквозного проветривания бревенчатых бань) делают в стенах в виде отверстий (или застеклённых окошек), открывающихся при сушке бани, на чердаках во фронтонах и под карнизами (постоянно открытые), в дощатых потолках (бревенчатых накатах) в виде горизонтальных каналов под слоем мха (стружек) с глиной, а также в цоколях. Роль продухов (и их количество) увеличивается при обивке сруба вагонкой или облицовке кирпичом. Ещё большую роль приобретают продухи в каркасных и кирпичных (газопенобетонных) банях. В таких строениях вентиляционные каналы для устранения аварийных увлажнений выполняют одновременно и функции постоянного вывода пара из стен во время длительной (постоянной) работы бань.

Вообще говоря, вентилируемые воздушные прослойки для предотвращения выпадения конденсата в паропроницаемых стенах и продухи консервирующей вентиляции не одно и то же. Действительно, первые устраиваются лишь при наличии паробарьеров. Например, если бревенчатую баню обшить кровельным железом, то пар, диффундируя через бревенчатые стены, будет конденсироваться на холодном железе, если не будет предусмотрено постоянное во время банной процедуры вентилирование зазора между железом и брёвнами наружным атмосферным воздухом (концепция вентилируемого фасада). Но можно сделать так, чтобы зазор всё-таки увлажнился за счёт конденсации пара, и только потом (после приёма банной процедуры) открыть каналы вентилирования зазора наружным атмосферным воздухом (концепция консервирующей вентиляции). Если концепция вентилируемого фасада требует гарантированного, заведомо достаточного вентилирования (толщины воздушно-зазора не менее 60 мм и наружных вентотверстий из расчёта 75 см^2 на 20 м^2 площади стен по СП 23-101-2000 для капитальных постоянно обитаемых строений), то концепция консервирующей вентиляции допуска-

ет очень длительное просушивание (несколько суток) и может быть обеспечена даже за счёт щелей в обивке.

Скорость движения воздуха в каналах продухов полностью определяется ветровым напором и не может превышать во входном отверстии (щели) скорость ветра (см. раздел 4.1.5). При малых скоростях смены воздуха в продухах (в воздушных прослойках, полостях) в процессе просушивания примыкающих к продухам конструкций могут образоваться повышенные влажности воздуха, препятствующие дальнейшему просушиванию: прослойки воздуха «задыхаются», «запариваются». Поэтому проходные сечения продухов не должны быть слишком маленькими: часовой расход влаги, выносимой ветровоздухом, должен быть больше диффузионного потока через просушиваемые конструкции $3600 \cdot a^2 V d \geq \mu \cdot L \cdot 4ad / \delta$, где a – поперечный размер продуха, V – скорость ветра, d – плотность насыщенного пара при температуре стены, μ – паропроницаемость конструкции, L – длина продуха, δ – расстояние от продуха до высушиваемой конструкции. Отсюда следует, что калибр канала продуха (равный поперечному размеру, делённому на длину) должен быть больше $a/L \geq 10^{-4} / \delta V$. Чем больше скорость ветра и чем больше расстояние от продуха до центра высушивания конструкции, тем меньше может быть калибр продуха. Так, если продух расположен вдоль одной из балок пола толщиной 0,1 м, имеет длину 3 м и скорость воздуха в нём, предположим, равна (0,1–1) м/сек, то поперечный размер продуха должен быть порядка (1–10) мм, что вполне обеспечивается неточностями

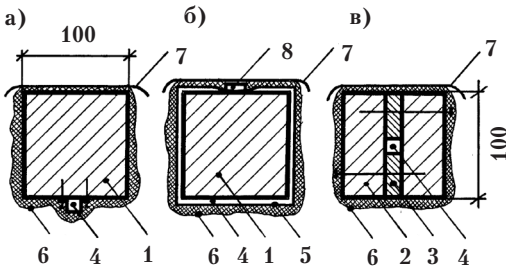


Рис. 58. Модельные примеры продухов (вентиляционных каналов) балок пола бани: а – малая площадь контакта внешнего канала с балкой, продолжительность сушки с 40% до 30%-ной влажности 1 год, б – полный охват балки вентканалом, продолжительность сушки 0,5 месяца, в – вентканал расположен внутри балки, продолжительность сушки 1 месяц. 1 – деревянная

балка сечением 10×10 см² и длиной 3 м (вид вдоль балки), 2 и 3 – клеёная (сколоченная) балка из двух досок 2 и двух вставок 3 с образованием продольного (осевого) продуха 4 сечением 1×1 см², 4 – вентиляционный канал (продух, зазор) общим сечением 1 см² с возможной закладкой нагревательного электрокабеля для сушки, 5 – бесконтактная листовая гидроизоляция (из рубероида, пергамина, кровельной стали, алюминиевой фольги и т. п.) с образованием зазора 4 вокруг всей балки, 6 – контактная гидроизоляция балки (битумная мастика, масляная краска), 7 – кровельная гидроизоляция (зонтик из рубероида, стали, фольги) от потоков воды сверху, 8 – прижим (замок) охватывающей гидроизоляции.