

Ю.М.Хошев, Е.А.Исупов



О ПАРЕ В РУССКОЙ БАНЕ

математические аспекты

**АЛЬЯНС
ПЕЧНЫХ ДЕЛ МАСТЕРА
2026**

Баня в славенском языке значит омовение:
в общем же употреблении означает здание, в коем парятся и моются.
Словарь Академии Российской, СПб, Императорская Академия Наук, 1789.

Баня - место, где парятся и моются (Церк. омовение, очищение).
Словарь русского языка, СПб, Императорская Академия Наук, 1891.

Баня - помещение, оборудованное для мытья тела с одновременным действием воды и горячего воздуха (в турецких и римских банях) или пара (в русской бане).
Большая советская энциклопедия, М.: СЭ, 1969.

Баня - помещение, предназначенное для омовения всего тела теплой водой... у нас под словом „баня“ обыкновенно подразумевают паровую баню, которая у наших соседей и других народов известна под названием русской бани.
Брокгауз Ф. А., Ефрон И. А., Энциклопедический словарь, СПб, 1890.

Паровая, русская баня - строение или покой, где моются и парятся, не просто в сухом тепле, а в пару.

Парить - держать в пару, сыром жару (испарилась, подпарились).
Парной - теплый, горячий, с чего пары идут.

Пар - душа, дух, жизнь, животная теплота. Парная баня, горячая, в пару.
В. И. Даль, Толковый словарь живого великорусского языка, М.: Имп. Моск. Ун-т, 1865.

Парь - жара, зной. Из праславянского «преть».
А. К. Шапошников, Этимологический словарь русского языка, М.: Наука, 2010.

УДК 696/697

ББК 38.625

X87 **Хошев Юрий Михайлович, Исупов Евгений Алексеевич**

О паре в русской бане. Математические аспекты, М.: НП Альянс ПДМ, 2026. - 32 с.

Анализируется физическая суть паровых бань. Обсуждаются климатические условия, выявляются требования к каменкам, описываются процессы парообразования и пароперегрева, изучается смешение пара с воздухом с сопутствующей конденсацией.

Рассматривается многоликое понятие “пара”, зародившееся на Руси как внутреннее влажное тепло (в том числе, животное), а затем постепенно приобретающее совсем иные смыслы - как испарения, как туманы (клубы пара), как газообразное состояние воды, как пар технический “паровозный” и как пар гуманитарный банный.

Издание научно-популярное, рассчитано на технически подготовленного читателя.

Понятие парной бани



Более миллиона лет назад, еще задолго до появления *Homo Sapiens*, предки человека освоили рукотворный костер. С тех пор зародились отапливаемые жилища, горячая еда и теплое мытье-очищение.

Греясь у жаркого огня, древние люди потели, чесались, терлись, соскабливая с кожи грязь - это было "дикое" мытье (**потовая баня**).

Освоив простейшие емкости, люди научились носить-лить-плескать воду на раскаленные камни очага и получать пар, который конденсировался на коже в виде росы, которой и мылись (**паровая баня**).

Придумав рукотворную посуду (долбленки, плетенки, горшки, шайки, ведра, тазы), люди стали бросать в воду раскаленные камни из очага (а со временем и греть воду на костре) и мыться ограниченными количествами теплой воды, не погружаясь целиком в воду (**шаечная баня**).

Потовую, паровую и шаечную бани (как горячее мытье на жарком воздухе) можно объединить единым условным термином **парная баня** (то есть, теплая баня - от древнейшего понятия "пара" как тепла).

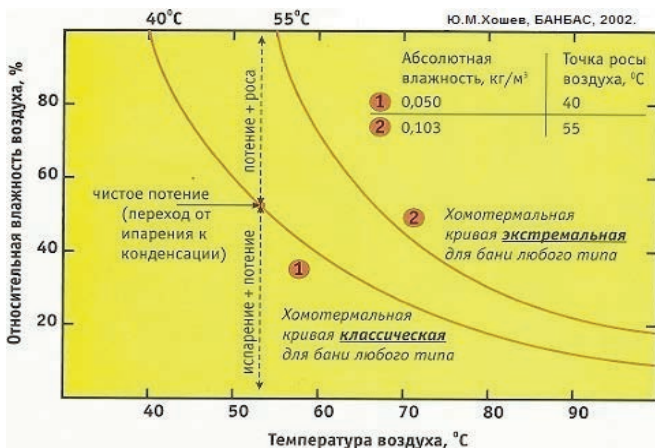
С изобретением металлических водогрейных котлов и водопровода, греть и транспортировать в громадных количествах воду оказалось дешевле и проще, чем жарко греть помещения. Парная баня в городах не выдержала конкуренции с ваннами и душами, заполнившими квартиры многоэтажных домов. Люди стали мыться с погружением всего тела в горячую воду. Решающую роль сыграло также то обстоятельство, что мытье превратилось в столь желанную интимную процедуру. В результате еще в СССР баней в быту стали называть абсолютно все виды мытья, отличающиеся от квартирных ванн и душей.

Тем не менее, парные бани, сыгравшие выдающуюся роль в развитии цивилизации, не могут исчезнуть из жизни людей никогда, поскольку являются разновидностями мытья.

Совокупность потовой, паровой и шаечной бань называют русской баней..

В наш век, ввиду ухода массового мытья в ванны и души, парные общественные бани стали восприниматься скорее как "водные курорты" (а порой и как чисто тепловые процедуры типа саун) для оздоровления, развлечения и отдыха. В этом плане особую престижность приобрела именно **паровая баня** - веничные, ингаляционные и экстремальные парильни с конденсацией горячих водяных паров на кожу человека.

Хомотермальная кривая



Прежде, чем приступить к анализу сущности "банного пара", необходимо перевести на математический язык само понятие паровой бани.

Современный горожанин начинает познавать парные бани с банальной ситуации, когда в ванной комнате исчезает горячая вода "из под крана". Обывателю приходится греть воду на кухонной плите с намерением помыться с тазиком в ванне или в душевой кабине. Однако, с первым же обливанием-плесканием выясняется, что смачивание всего тела даже горячей водой вызывает чувство неприятного холода. То есть, до обливания было тепло, а после обливания - неожиданно холодно.

Горожанину становится понятно, что исправить ситуацию можно лишь путем нагрева и увлажнения помещения. Именно это фактически и окажется переделкой ванной комнаты в парную (теплую) баню.

Причиной холода на теле является испарение воды с мокрой кожи с потреблением тепла (скрытой теплоты испарения). Испарение прекращается при равенстве концентраций водяных паров в воздухе бани и непосредственно у кожи (то есть, при равенстве точки росы воздуха ТТР и температуры кожи в бане условно $T_k = 40^{\circ}\text{C}$). Это условие в привычных метеорологических координатах Т-ОВ (температура - относительная влажность воздуха) изображается в виде графика $TTR = const = 40^{\circ}\text{C}$.

Этот график именуем далее **хомотермальной линией** (хомотермой).

Хомотерма отвечает бытовым понятиям "духота" - как воздух, выдыхаемый из легких (из груди - "из души") и "испарина" - как пот на коже.

Паровые режимы



Хомотермальная линия разделяет метеозоны **сухих бань** (с испарением воды с кожи) и **паровых бань** (с конденсацией пара на кожу).

Влажность воздуха (паро-воздушной смеси ПВС) будем отражать следующим образом:

T50 - температура влажного воздуха (ВВ) по сухому термометру равна 50°C.

TMT50 - температура влажного воздуха (ВВ) по мокрому термометру равна 50°C.

TTP50 - температура точки росы ВВ (точка росы ВВ) равна 50°C.

OB50 - относительная влажность ВВ равна 50% (а T50/OB50 означает T50 при OB50).

AB50 - абсолютная влажность ВВ равна 50г H₂O / 1м³ ВВ (AB = 0,01 x OB x ПНП).

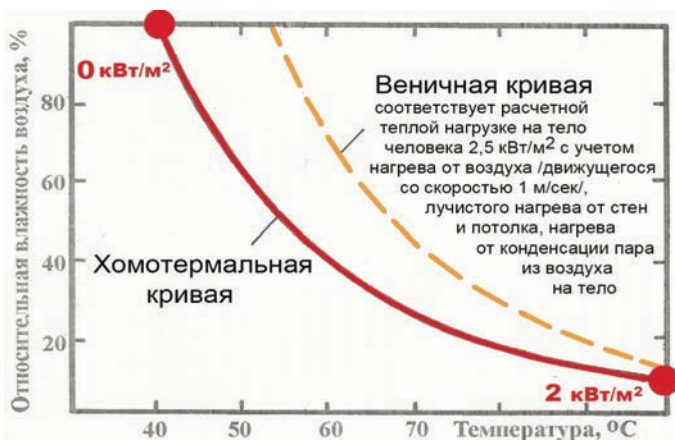
ПНП50 - плотность насыщенного водяного пара равна 50г H₂O / 1м³ (см. таблицу).

MB50 - массовая влажность ВВ равна 50г H₂O / 1кг ВВ.

Термин "сухая баня" не означает, что в бане находится именно сухой воздух с ОВ менее 50% (с сохнувшими вениками). А термин "паровая баня" не означает, что в бане именно влажный воздух с ОВ более 50% (с мокнувшими вениками). Так что сухая баня не является обязательно суховоздушной. Причина в том, что веник может нагреваться до температуры ВВ, а мокрая кожа нагреваться выше условно 40°C не может по причине непереносимости.

Плотность насыщенного водяного пара ПНП при различных температурах (при температурах выше 100°C - при давлении пара P = 1 атм)							
Температура, °C	Содержание влажного пара, г/м ³	Температура, °C	Содержание влажного пара, г/м ³	Температура, °C	Содержание влажного пара, г/м ³	Температура, °C	Содержание влажного пара, г/м ³
-15	1,39	55	104,28	140	525,58	280	389,56
-10	2,14	60	130,09	150	512,64	290	382,55
-5	3,24	65	161,05	160	500,36	300	375,79
0	4,64	70	197,95	170	488,67	350	345,32
5	6,80	75	241,65	180	477,55	400	319,47
10	9,40	80	292,99	190	466,94	450	297,25
15	12,82	85	353,23	200	456,81	500	277,94
20	17,29	90	423,07	210	447,13	550	261,00
25	23,03	95	504,11	220	437,86	600	246,02
30	30,36	99,4	586,25	230	428,97	650	232,67
35	39,59	100	583,24	240	420,45	700	220,99
40	51,13	110	568,98	250	412,26	750	209,90
45	65,42	120	553,67	260	404,40	800	200,11
50	82,94	130	539,23	270	396,84		

Тепловой поток на кожу

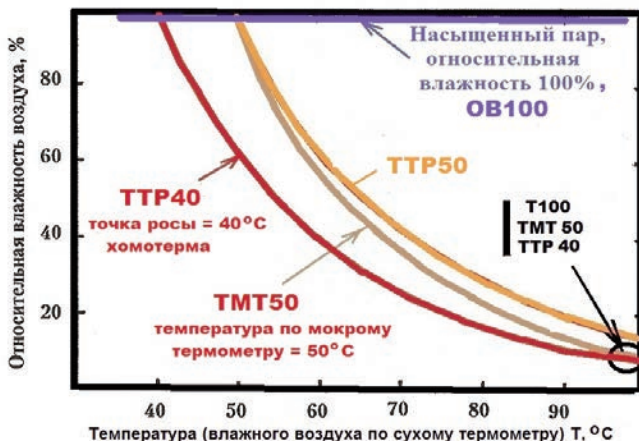


Микроклимат бань рассчитан на людей с мокрой кожей, а микроклимат жилья - на людей с сухой кожей. Мытье на воздухе требует жарких помещений - по госнормам минимум Т30 для мытейных и Т40 для парильных помещений (и лишь Т18 для жилых и ванных комнат). На практике же в парильнях используются значительно более высокие температуры. Но даже при Т120 в сухих высокотемпературных финских саунах можно ощутить холод при обдуве мокрого тела (из-за испарения воды с кожи).

Паровые бани требуют как минимум АВ50, то есть надо рассчитывать на испарение порядка 50 г воды на кубометр помещения. Расчетные оценки нагрева тела (с температурой кожи $T_k = 40^\circ\text{C}$) показывают, что тепловой поток, к примеру, равный $2,5 \text{ кВт/м}^2$ (отвечающий возможному появлению экстремальности) достигается при Т55 /ОВ100, а также при Т100/ОВ10. Это означает, во-первых, что указанная мощность нагрева может быть достигнута двояко - либо при низких Т за счет конденсации пара при ТТР55, либо при высоких Т за счет нагрева воздухом и лучистым теплом при ТТР40. А во-вторых, означает, что на хомотермальной линии рост температуры ВВ приводит росту расчетного теплового потока на кожу с нуля при Т40 до 2 кВт/м^2 при Т100 (без учета внутренних тепловыделений в организме порядка $0,1 \text{ кВт/м}^2$ в покое и $0,3 \text{ кВт/м}^2$ при физической нагрузке).

Особую роль играет понятие шпаркости - не просто экстремальности, а мгновенного возникновения непереносимости кожей (см.далее).

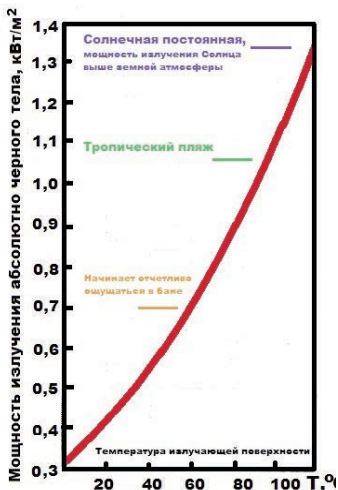
Влияние нагрева кожи



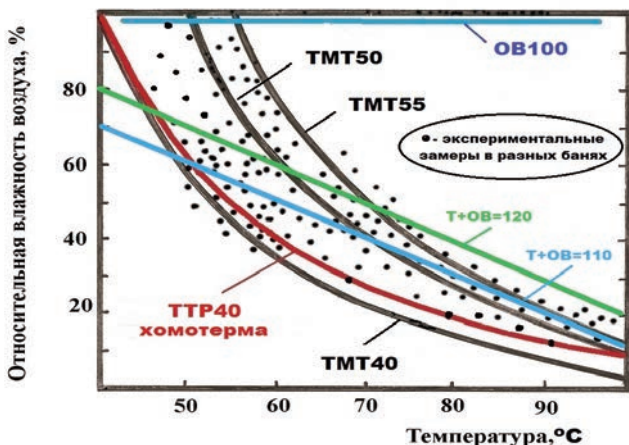
Хомотермальная линия подразумевает, что при всех метеоусловиях температура кожи T_k остается условно постоянной на уровне 40°C.

Однако ясно, что при длительном прогреве тела (а тем более при мгновенном кратковременном скачке температуры воздуха) не только сухая, но даже и мокрая кожа может нагреваться гораздо сильнее. Этот факт выявляется "мокрым термометром" (обернутым влажной тканью). Так, если в бане сухой термометр при TTP40 показывает T100, то мокрый термометр при той же TTP40 покажет всего лишь TMT50. Значит, и мокрая кожа также стремится к TMT50. В результате, конденсация (паровой режим) может наступить при более высоких TTP, что снизит тепловую нагрузку на кожу (эффект "легкого пара").

Температура кожи T_k может повышаться в бане (с тем же последствием) также и с ростом лучистых тепловых потоков с ограждающих конструкций, что может быть выявлено "шаровым термометром" (заклученным в полую сферу диаметром 90 мм с зачерненной поверхностью).

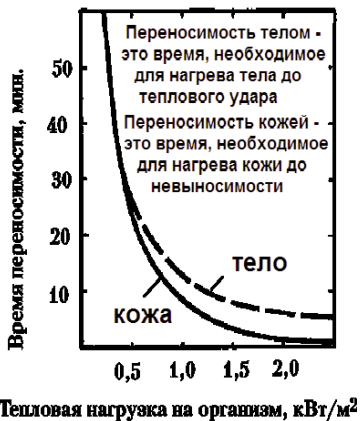


Микроклимат паровых бань

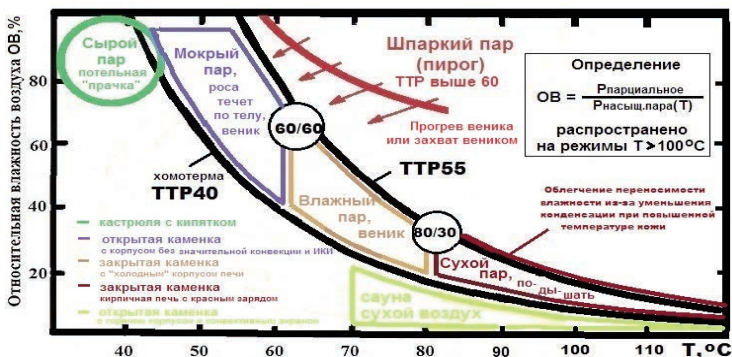


Натурные исследования метеопараметров бань, выполненные в 2000-х годах В.Н.Ляховым, подтвердили использование именно паровых режимов, что задним числом вполне понятно. В мытейном отношении это обеспечивает получение распаренной кожи для мытья (и пота для очистки пор кожи). В оздоровительно-развлекательном отношении это создает условия для тепловых нагрузок, особенно при использовании веничного парения. Большой разброс данных обусловлен динамично изменяющимися метеопараметрами как за счет особенностей эксплуатации бань, так и ввиду личных предпочтений банщиков.

К сожалению, люди не всегда способны конкретно описать свои ощущения и чаще ограничиваются общими эмоциональными оценками типа жарко, шпарко, вкусно, больно и т.п. Поэтому анализ микроклимата вынужденно сводится к выявлению предельных параметров, отвечающих экстремальной бане (предельно выносимой). Отличают переносимости телом и кожей. При малых тепловых нагрузках тело успевает нагреваться одновременно с кожей (причем незаметно в режиме привыкания). При высоких тепловых нагрузках кожа быстро перегревается, и наступает непереносимость кожей из-за ощущений жаркой боли, что не позволяет прогреть тело глубоко внутрь. Непереносимости обусловлены не метеоусловиями, а величинами тепловых потоков на кожу.



Классификация паровых бань



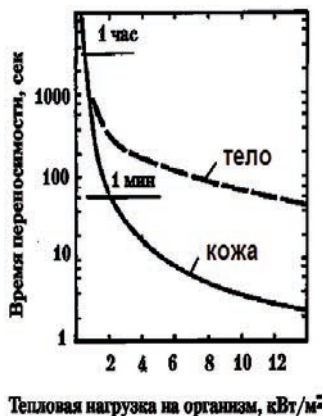
Все бани с метеорежимами выше ХТ категорируем как паровые бани. Высоковлажный воздух паровых бань традиционно называем "паром".

Праславянский термин "пар" (от слова "преть") зародился как внутреннее влажное тепло (в том числе, животное), а затем приобретал иные смыслы - как горячий вольный пар в духовой печи, как банный пар, как испарения, как туманы (дымки, клубы пара), как водяные пары (газообразное состояние воды), как пар технический (котельный "паровозный").

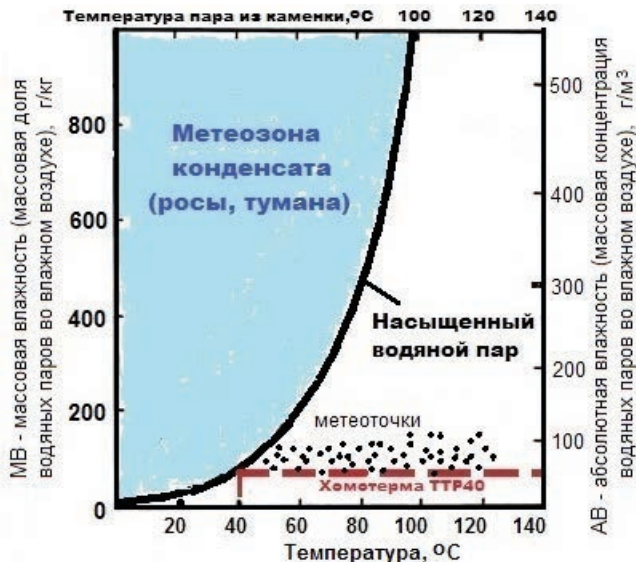
Помимо климатических парных бань есть и внеклиматические с нагревом тела (и потением) от физических нагрузок (римские термы), от горячего камня (хаммамы), от горячего песка, от солнца, от укутывания и др. Эти древние методы "дикого мытья" здесь на рассматриваются, хотя могут иметь суперсовременные развлекательные исполнения.

Все паровые режимы подразделяем по чисто климатическим признакам на области, разделенные метеоточками Т60/ОВ60 и Т80/ОВ30:

- мокрый пар (ОВ более 60%) с текущей по телу росой, с мокрыми полками и вениками, с возможными сильными ошпарами тела,
- влажный пар (ОВ от 30% до 60%) с влажными полками, с ослабленными ошпарами ввиду нагрева кожи горячим воздухом,
- сухой пар (ОВ менее 30%) с сухими полками, со слабыми ошпарами ввиду значительного нагрева кожи воздухом и лучистым теплом (желательны горячие полы).
- шпаркий пар у потолка бани, образующийся всплытием пара непосредственно из каменки и требующий развлечения.



Массовые метеокоординаты



Метеорологическое понятие относительной влажности воздуха ОВ привычно и полезно в быту (например, могут намекать на быстросохнущие на улице лужи или сохнувшие в бане полки, веники и волосы). Значения ОВ легко определяются даже простейшими гигрометрами, физически понятны, но для анализа паровых бань не удобны, поскольку не подсказывают, сколько же пара "в граммах" содержится в воздухе.

При дальнейших исследованиях будем пользоваться понятием массовой влажности воздуха МВ и графиками в координатах Т-МВ.

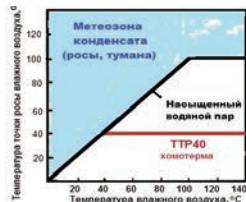
Рекомендации по метрологии РМГ 75 - 2014:

Массовая доля влаги (**массовая влажность**) - отношение массы влаги, содержащейся в веществе, к общей массе этого влажного вещества.

Массовое отношение влаги (массовое влагосодержание) - отношение массы влаги, содержащейся в веществе, к массе сухой части этого влажного вещества.

Массовая концентрация влаги (парциальная плотность, **абсолютная влажность**) - отношение массы влаги, содержащейся в веществе, к объему этого влажного вещества.

Температура, °С	40	50	60	70	80	90	100
Парциальное давление, атм	0,07	0,12	0,20	0,31	0,47	0,69	1,00
Абсолютная влажность, г/м ³	51	83	130	198	293	423	586
Массовая влажность, г/кг	45	79	135	220	356	581	1000



Метеокоординаты Т - МВ

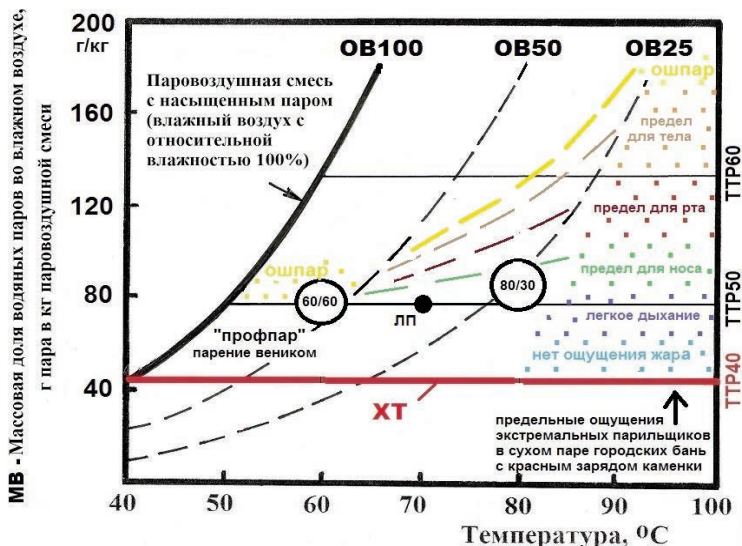


График в координатах Т-МВ может быть дополнен линиями постоянных ОВ и ТПР, что придает дополнительную информативность.

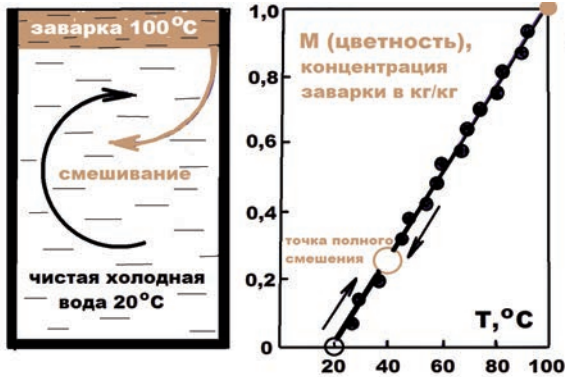
Настоящее издание не затрагивает физиологию бань, но вынужденно касается телесных (соматических) ощущений, поскольку бань без привязки к "живому" человеку не бывает.

Мокрый пар с Т(40-60) популярен среди вечных парильщиков, предпочитающих пониженные температуры для комфортной физической работы. Экстремальность процедуры достигается высокими скоростями обдува и касаниями тела горячими венниками. Излишняя влажность приводит к ошпарам. Мокрый пар чреват тепловыми ударами, поскольку допускает длительные парения с постепенным слабоощущаемым перегревом. Считается тяжелым для дыхания, но не из-за недостатка кислорода (можно затаить дыхание), а из-за избытка влаги (отсутствие испарительного охлаждения при вдохе воспринимается как духота). Вызывает одышку и сердцебиение (инстинктивное охлаждение дыхания с усиленным кровотоком). Известно, что самая душная баня бывает при обливе горячих стен горячей водой. Метеоточка "60/60" (Т60/ОВ60) считается экстремальной.

Влажный пар с Т(60-80) получают с закрытыми раскаленными каменками. Как и ожидалось, это "ядренный пар", но шпаркость, к удивлению, возникает при более высоких ТПР. Поэтому его называют "легким паром" (хоть со жгучими ощущениями "тела в огне", но не ошпаривающего). Видимо, при обдуве горячим воздухом роговой слой кожи успевает мгновенно и кратковременно нагреваться со снижением конденсации на кожу.

Сухой пар с Т(80-120) получают в постоянно отапливаемых банях с горячими полами с кирпичными печами с закрытыми раскаленными докрасна каменками. Если сухой раскаленный воздух саун иссушивает с ощущениями стянутости, першения и сухих ожогов, то увлажненный переносится экстремальными парильщиками вплоть до ТПР65.

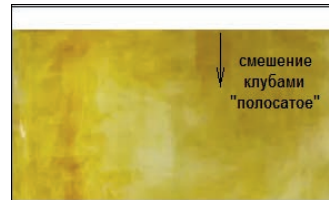
Идеальный процесс смешения



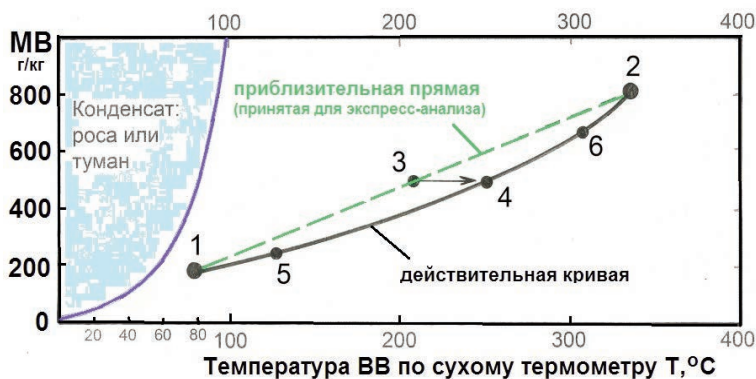
Добавим в стакан с холодной прозрачной водой горячую коричневую чайную заварку. Холодная вода будет имитировать атмосферу бани. Горячая заварка будет имитировать горячий пар из каменки. Помешаем ложечкой. Коричневые потоки заварки будут смешиваться с водой турбулентными клубами (неоднородно, то есть слоями - "полосатое"). Но рано или поздно, всё смешается и получится некая средняя цветность и температура. Если затем будем повторять процесс, добавляя ещё и ещё новые порции заварки, то получим некую прямую смешения М-Т.

Теперь рассмотрим детальную динамику смешения - в каждый момент времени в каждый объемчик-завиток воды подмешивается некое количество заварки и горячей воды одновременно и пропорционально. То есть, чем выше цветность объемчика, тем выше его температура. Завиток коричневой заварки может при смешении попасть даже сразу сверху на дно, но всё равно все замеры лягут на одну прямую. Даже смеси смесей при смешении лягут на ту же прямую М-Т.

То есть вся невообразимая, казалось бы, вакханалия смешения в пространстве и времени будет подчиняться некоему строгому арифметическому закону, зависящему только от исходных температур воды и концентраций заварки. Еще труднее представить себе, что по измерению концентрации и температуры всего в двух произвольных точках в пространстве и времени можно найти исходные температуры и концентрации заварки.



Идеальное смешение пара с воздухом

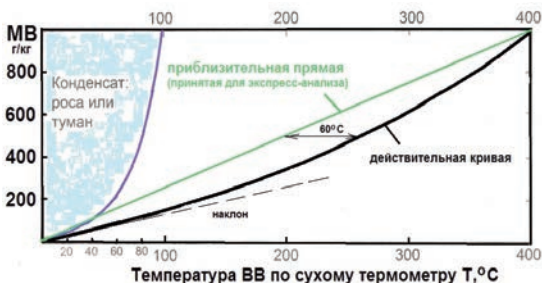


По аналогии с вышеприведенным примером заварки, рассмотрим процесс смешения двух "влажных воздухах" с метеоточками 1 и 2. В массовых метеокоординатах Т-МВ (и только в них) продукты идеального смешения 3 должны лечь условно на отрезок прямой линии 1-2.

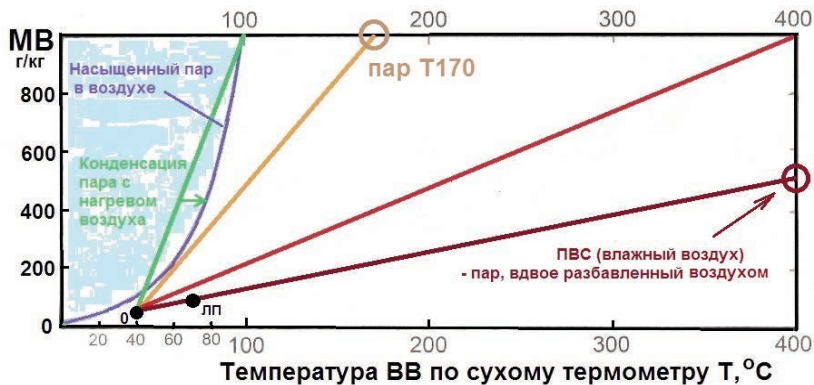
В отличие от поясняющего примера с заваркой влажный воздух (паровоздушная смесь ПВС) представляет собой смесь компонентов, имеющих разную энтальпию. Сухой воздух имеет удельную теплоемкость $C_p = 1,00$ кДж/кг.град, водяные пары $C_p = 1,86$ кДж/кг.град. Вследствие этого, строго говоря, линия идеального смешения приобретает вид кривой линии. То есть точка 3 на условной прямой соответствует точке 4 на точной кривой. Все возможные точки лежат на этой кривой. Точка 5 соответствует преимущественному содержанию холодного воздуха, а точка 6 - преимущественному содержанию горячего воздуха.

Для простоты ориентировочного визуального экспресс-анализа графиков, в дальнейшем будем пользоваться приближенной прямой смешения 1-2.

Такой графический прием (банно-паровая диаграмма) полезен для наглядного предсказания возможных результатов смешения пара с воздухом бани, в частности, при однократной подаче пара из каменки в воздух, поскольку иных способов анализа нет. Но подход полезен и для более простых случаев постоянного (дробного или непрерывного) увлажнения.



Необходимые температуры пара



Предположим, что в бане Т40/ОВ50, а нам для парения нужна некая иная метеочка "легкого пара" ЛП условно с Т70/ОВ40, в которой известно, что легко дышится, а веник начинает ощущаться при ТТР47 и становится труднопереносимым при ТТР53 (В.Г.Гребенкин).

Если использовать пар "из чайника" Т100/ОВ100, то пар сконденсируется в воздухе (по зеленой линии). Баня заполнится туманом - клубами пара (А.Н.Разоренов). Теплота конденсации будет уходить на поддержание температуры тумана на кривой насыщенного пара. По мере смешения с воздухом туман может испариться, но попасть в точку ЛП нам все равно никак не удастся. Будет не хватать температуры пара.

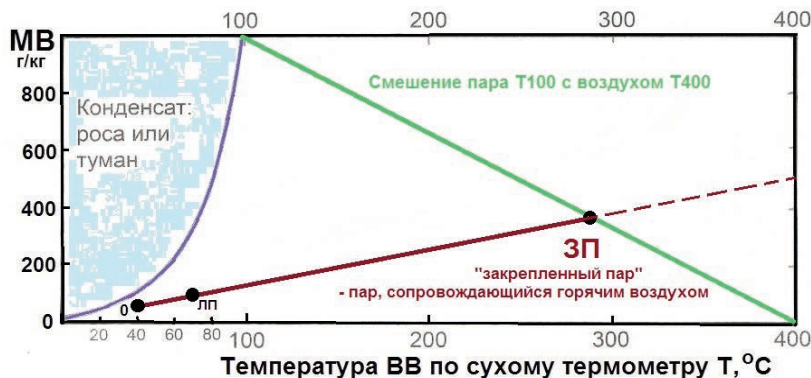
Клубы пары исчезнут, если использовать перегретый пар - то есть, пар "из чайника", но только дополнительно нагретый при атмосферном давлении в горячем "носике чайника" (в трубе) свыше Т100.

Но ни при паре Т170 и даже при паре Т400 попасть в точку ЛП не удастся. И только разбавив ("закрепив") пар в каменке раскаленным воздухом (нагретым в каменке), можно будет получить точку ЛП.

Если вместо условных прямых использовать строгие кривые смешивания, то уровень необходимых температур откорректируется чуть ли не вдвое в меньшую сторону. Но тем не менее ясно, что получение сухих режимов требует высоких температур пара, то есть раскаленной каменки.

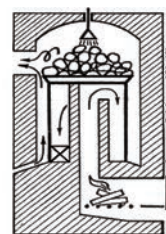
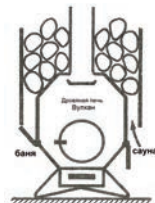


Закрепление пара горячим воздухом

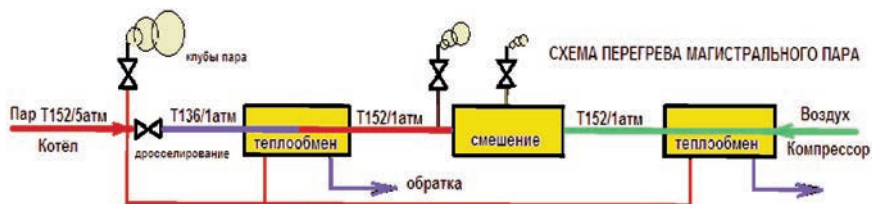


Таким образом, если для получения мокрого пара достаточно открытая горячая каменка, способная лишь испарять воду, то для получения влажного пара требуется закрытая разогретая каменка Т500 для перегрева пара, а для получения сухого пара необходима раскаленная докрасна каменка Т800, которую желательно еще добавочно продувать раскаленным воздухом.

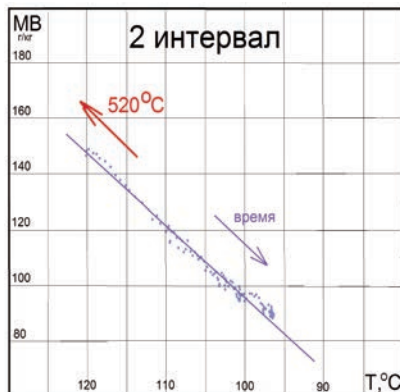
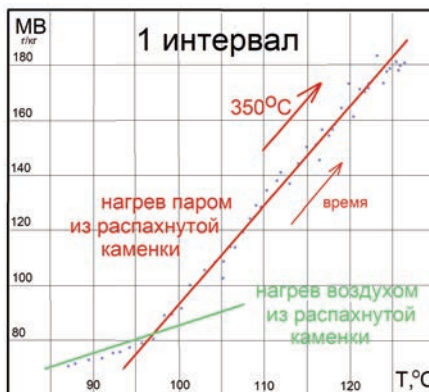
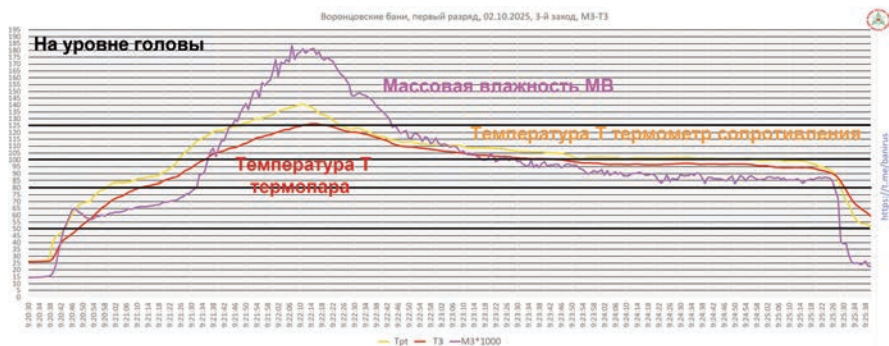
Мыслим и иной способ повышения высокой эффективной температуры пара - пар из котла смешивают сначала с раскаленным воздухом (по зеленой линии) и только потом смесь подают в воздух парильни (по коричневой линии). В этом случае пароперегреватель ("баный кондиционер") содержит электрическую тепловую пушку, в струю которой подается пар из кипятыльника.



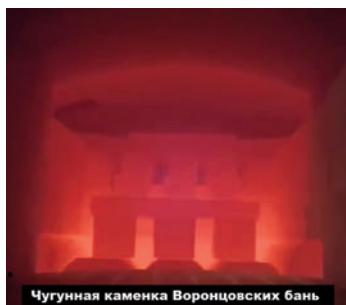
Разбавление пара воздухом имитирует повышение теплосодержание пара, поскольку пар несет с собой не только свою теплоту перегрева, но и теплоту сопровождающего воздуха. Разбавление пара применяется наиболее широко в печах-каменках для саун.



Натурное идеальное смещение

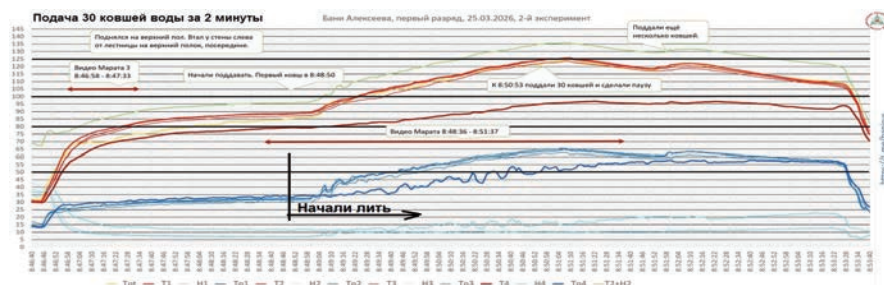


Эксперименты в Воронцовских банях, выполненные с быстродействующими датчиками типа SHT-85 с непрерывной записью на логгер С.Н.Калинина, подтвердили возможность получения режимов с линейным характером зависимости МВ-Т в парильной с печью красного заряда. То есть подтвердилась возможность идеального смешения пара с воздухом даже без перемешивания опухалом.

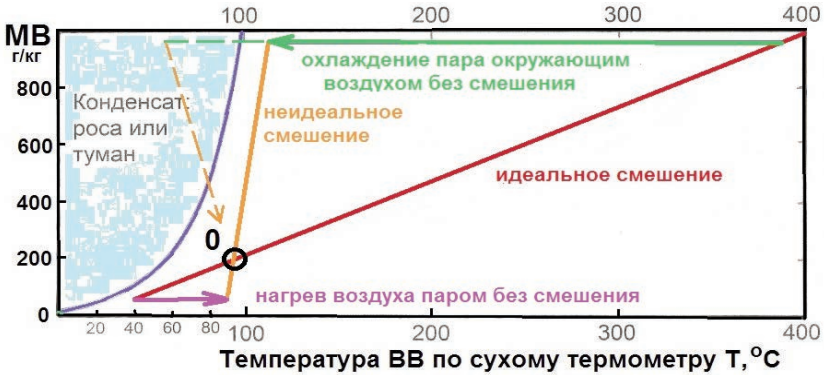


При открытии дверцы каменки сначала идет прогрев воздуха в бане за счет горячего потока воздуха из каменки и ИК-излучения (зеленая прямая). Затем следует прогрев горячим паром из каменки (красная прямая). Прогрев бани конвекцией (за счет входа холодного воздуха в каменку и выхода горячего воздуха из каменки) подтвержден дополнительно - оказался незначительным. Ввод же воды в каменку значительно повышает скорость прогрева воздуха в бане, поскольку подачи даже 50 грамм воды создают объемы порядка 200 литров перегретого пара.

Отметим, что и в период охлаждения воздуха в бане (после поддач) зависимость МВ-Т может сохранять линейный вид.



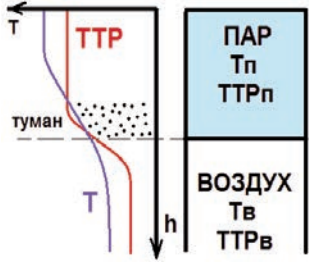
Неидеальное смешение



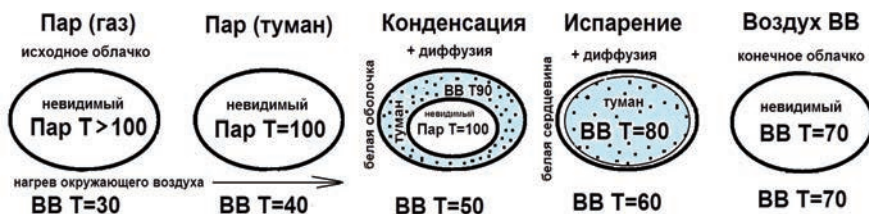
Вышеприведенные примеры и рассуждения соответствуют идеальному смешению в том смысле, что температура и цветность модельной чайной заварки "перемешиваются" с водой с одинаковой скоростью. Но ведь возможен случай, когда заварка сначала остынет и только потом начнет смешиваться с водой. Рано или поздно после полного смешения цветности и температуры всех смесей от разных заварок все равно лягут на ту же прямую смешения. Однако, в ходе смешивания цветности и температуры в конкретных пространственных точках будут располагаться не на прямой, и упрощенный анализ станет невозможным.

Такие случаи характерны и для смешивания пара с воздухом бани. Передача тепла теплопроводностью (столкновениями молекул) происходит быстрее, чем распространение молекул воды диффузией. В результате, даже при адиабатическом процессе (без касания пара стен бани) пар из каменки может сначала охладиться в окружении преобладающего количества воздуха в бане (по зеленой линии), и лишь затем начнет смешиваться с воздухом, несколько нагретым при охлаждении пара (по бежевой линии). Ситуация усугубится, если пар остынет настолько сильно, что начнется объемная конденсация (туманообразование), хотя линия смешения не предвещала такого.

Например, если T воздуха в бане ниже T_{TP} пара в пироге пара у потолка, то в результате ускоренного охлаждения пирога возникнет слой тумана, поддерживающий T на границе. Это будет случай "прибитого" (устойчивого к размыванию) пирога пара.



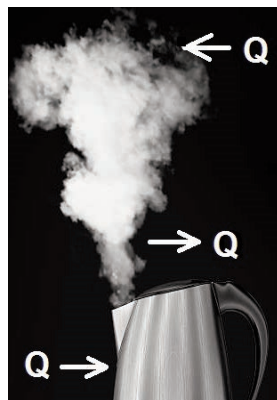
Полосатость банного пара



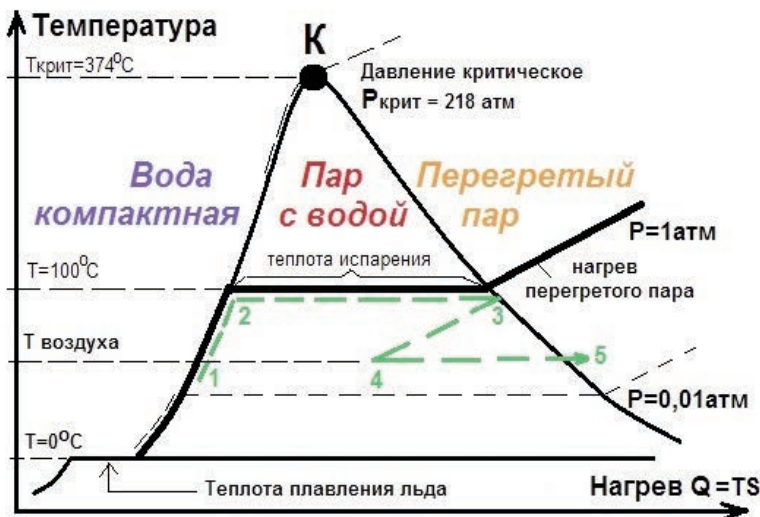
Пар из каменки поступает в воздух порционно (поддачами), при этом в воздухе бани одновременно образуются значительные количества перегретого пара в различных объемных конфигурациях. Эти объемы пара в виде пирогов, облаков, ламинарных потоков и турбулентных струй создают неоднородную в пространстве и нестационарную во времени метеообстановку банного пространства, которая в конкретной точке парения воспринимается "полосатой" (то горячо, то холодно, а порой и шпарко с ощущениями "кусачего пара" - покалываниями).

Эта изменчивая картина дополняется процессами на разделах фаз газ-пар, зачастую сопровождающимися конденсациями. Так, в первом приближении к реальности, исходное облачко перегретого пара сначала охлаждается до $T=100$, затем на границе образуется оболочка тумана, потом начинает проявлять себя диффузия (пара в воздух и воздуха в пар), приводящая в конце концов к полному растворению в воздухе пара и тумана. На примере кипящего чайника видно, что тепло Q сначала подводится к воде для кипения-парообразования, затем теплота парообразования частично передается в воздух конденсацией, после чего тепло воздуха потребляется на испарение тумана.

Туман ("водяная пыль") может длительно проявляться как в виде границ-оболочек с четкими контурами (которые зачастую в быту называют "струйками" пара), так и в виде "клубов" - туманных объемов с мутными расплывчатыми границами. Напомним, что сами частицы воды не обладают теплотой конденсации в отличие от пара физического невидимого.



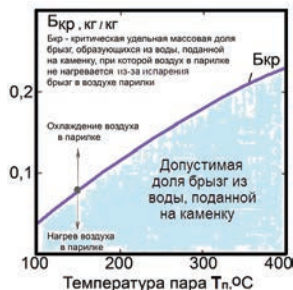
Технический пар



Температура, °C	0	50	100	200	300	374,15
Теплота испарения, кДж/кг	2501	2382	2256	1941	1404	0

Бытовой "пар из чайника" является частным случаем понятия "технического пара" - гетерогенной (двухфазной) структуры "вода-пар" с различной степенью дисперсности (с конкретным размером частиц воды).

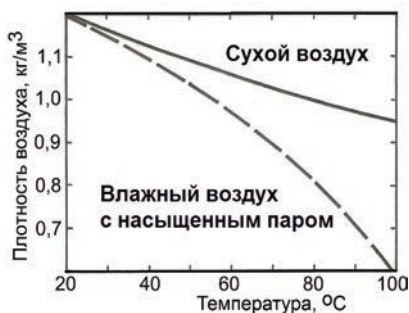
Согласно известной диаграмме парообразования порция жидкой воды 1 (компактной или диспергированной) нагревается с повышением парциального давления паров P до $T=100$ (точка 2 зеленой линии), затем при давлении 1 атм кипит (потребляя теплоту испарения), а затем, вся превратившись в насыщенный физический водяной пар 3 (без воздуха), продолжает нагреваться как перегретый пар (ненасыщенный).



В случае "чайника", насыщенный пар 3 поступает в в большие объемы холодного воздуха (со снижением парциального давления пара P), охлаждается до комнатной температуры с конденсацией в туман 4, после чего, разбавляется смешением с воздухом и испаряется 5.

Аналогичный процесс парообразования происходит и с брызгами воды, вылетающими вместе с паром из камелки - капельки воды испаряются с охлаждением пара.

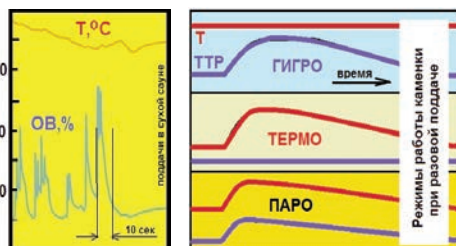
Открытая каменка



Открытая каменка имитирует открытую кастрюлю (сковородку) с кипящей водой. Вода, растекающаяся по раскаленному камню (или металлу), бурно вскипает. Образовавшийся пар T_{100} с брызгами всплывает за счет низкой плотности пара. При этом температура воздуха над каменкой зачастую падает из-за охлаждения камней и испарения брызг.

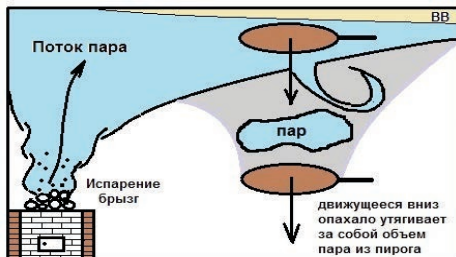
Если печь-каменка создает мощный восходящий поток воздуха, то в помещении имеются конвективные потоки — либо циркуляционные при закрытой двери, либо вентиляционные (естественные приточно-вытяжные). При разовой поддаче возникает всплеск влажности воздуха по тракту конвекции, что указывает о слабом смешении пара с воздухом.

Если печь-каменка не создает значительных восходящих потоков воздуха, то пар, сдвигая приточный воздух, скапливается наверху в виде паровой пирога. При этом пар может охлаждаться и осушаться на потолке. Пар из пирога захватывают веником (опухалом) или перемешивают для увеличения объема паровой зоны.

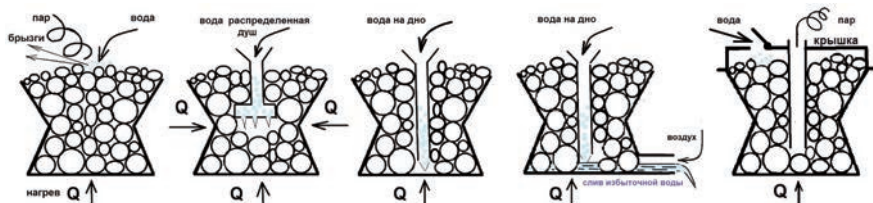


По характеру изменения метеообстановки в бане после поддачи можно выделить три режима работы каменки.

Большую роль при формировании режимов играет «королева банного пара» — водяная пыль разной природы..



Испарение брызг с камней



Особенностью открытых каменок (порой не устранимой) является недостаточная температура пара - испарениям с камней Т100 просто негде подогреться, кроме как от горячего воздуха над каменкой. Вследствие этого, пар над каменкой при вылете в "холодный" воздух легко конденсируется в туман, а полученный "банный пар" по банно-паровой диаграмме может соответствовать только влажному режимам.

Брызги же с камней, хоть и придают мокроту дисперсному техническому пару, но сами по себе не определяют климатическую обстановку. Однако, крупные брызги (более 1 мм) могут обжигать тело (хотя и быстро оседают на пол). Более мелкие брызги витают и, испаряясь, дополнительно охлаждают пар из каменки и воздух над каменкой.

Каменка должна осушать пар (сепарировать "как в паровозе", улавливать и испарять брызги) и еще дополнительно подогреть пар из каменки выше Т100 для испарения брызг и предотвращения тумана.

Подача воды в глубину каменки (как с помощью распределителя-душа, так и с помощью трубки до массивного теплоёмкого дна) сохраняет высокую температуру верхних слоев камней. Брызги улавливаются на поверхности вышележащих камней, испаряются, после чего пар подогрывается верхними камнями. Можно разбавить пар в каменке воздухом, чтобы интенсифицировать процессы испарения. Можно закрыть каменку крышкой, приближаясь к принципам закрытых испарительных и пароперегревающих каменок.

Так, например, открытую каменку обычной сауны можно просто накрыть металлическим колпаком. Брызги сначала гравитационно сепарируются, мелкие садятся на стенки, испаряются, а пар затем подогрывается раскаленными стенками топки. Снижение брызгообразования издавна считалось серьезным улучшением качества технического пара в промышленности. В банных же печах это стало главным критерием качества.

Аналогичные задачи решаются и с аппаратами непрерывной паро-генерации различных систем (кипяtilьниками с перегревом пара).



Закрытые чугунные каменки



Брызгообразование в каменках усугубляется при переходе с разогретой каменной закладки (жадеид, нефрит) на раскаленную (красную по цвету каления) металлическую закладку (заряд). Высокая теплопроводность металла в сочетании с высокой объемной теплоемкостью обуславливает чрезмерно интенсивное вскипание воды на поверхности металла. В современных печах городских бань многотонные закладки из хромистого чугуна нагреты газовыми горелками порой до Т900.

В бытовых дровяных печах камни нагреты обычно от Т300 и выше - копоть начинает выгорать при Т350, а сажа при Т500.

Материал	Теплопроводность	Теплоемкость	Плотность	Расширение
	Вт/м.град			
Чугун серый	50	0,5	6800	10
Сталь угл.	60	0,5	7800	10
Сталь н/ж фер.	25	0,5	7800	9
Сталь н/ж ауст.	15	0,5	7900	16
Жадеид	3	1	3400	4
Шамот кирп.	0,7	1	1900	5
Вода	0,6	4,2	1000	линейное 100

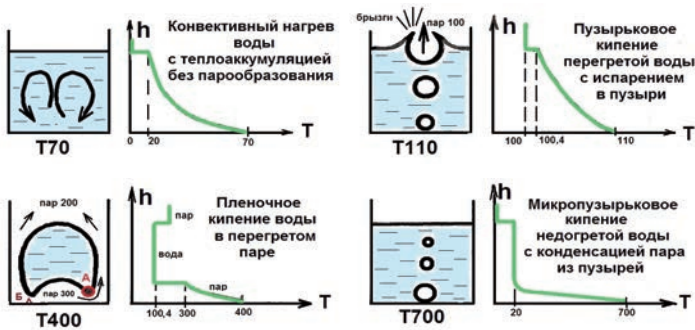
Оксид углерода СО при подаче воды на закопченные каменки бытовых банных дровяных печей приборно не обнаруживается (Е.В.Колчин).

С открытыми раскаленными металлическими каменками практически невозможно безопасно работать в бытовых банях - при отсутствии экрана брызги кипятка при подаче тут же летят в лицо и на тело. Поэтому актуальны лишь закрытые раскаленные каменки. В зависимости от метода подачи воды мыслятся различные механизмы испарения воды - на лету (беззвучные), отскакивания воды от паровой подушки (ухания), вскипания перегретой воды в зазорах с гидроударом (хлопком), пузырьковые кипения на поверхности (шипения).



Механизмы кипения воды различны при избытке воды (закалке) и при недостатке воды (смачивании).

Стадии кипения воды



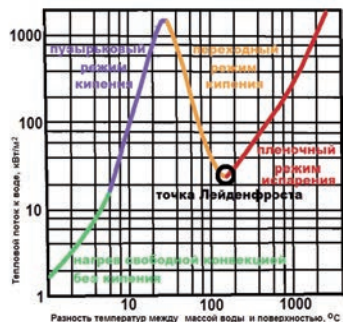
Для описания нагрева воды в теплофизике вводится понятие температурного напора - разницы (перепада) температур на греющей поверхности и в массе воды. Тепловой поток в воду равен $q = k\Delta T$, где k - коэффициент теплопередачи, ΔT - температурный напор. Нижние слои воды нагреты сильнее, чем вся масса воды (и даже могут быть перегреты).

При низких температурных напорах вода, нагретая на дне, всплывает, создавая конвективные потоки, нагревающие массу воды. Вода на дне может метастабильно перегреваться выше $T100$ и образовывать пузырьки пара (возможно и с растворенным воздухом), которые при подъеме схлопываются (конденсируются) с появлением характерного шума.

Если пузырьки пара достигают поверхности, начинается объемное кипение (пузырьковое). Из-за того, что вся масса воды уже перегрета выше $T100$, вода испаряется в объем пузырей, увеличивая их объем.

Если объемы паровых пузырей становится настолько большими, что начинают затруднять тепловой контакт поверхности с водой, то теплообмен начинает уменьшаться (переходный режим кипения).

И, наконец, в точке Лейденфроста паровые пузыри перерастают в пленку, полностью отделяющую воду от поверхности (кризис кипения). Теплообмен и парообразование становятся минимальными (но пар нагревается выше $T100$). Нарушения пленки возможны при возникновении турбулентностей в точке А и при наличии острых неровностей в точке Б. С ростом температуры греющей поверхности растет мощность лучистого нагрева воды.



Кипение на раскаленном металле



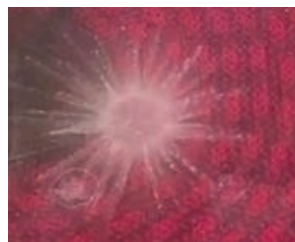
Учитывая эффект Лейденфроста, можно было бы ожидать, что вода на раскаленном металле практически не испаряется, и эффективность каменки по парообразованию должна быть равна практически нулю.

Но эффект Лейденфроста возникает как результат кипения метастабильно перегретой в объеме воде. А если на раскаленный металл ложится холодная вода ("недогретая" по научному жаргону), то пузыри не растут по мере всплытия ("эвакуации"), а наоборот, схлопываются. И паровая пленка возникнуть не может. Паровые пузыри образуются не крупными, а мелкими, поэтому такой режим кипения называется микропузырьковым. Паровые пузырьки отбирают тепло у греющей поверхности за счет скрытой теплоты парообразования (испарения) и отдают тепло вглубь воды за счет конденсации при схлопывании.

В мелкопузырьковом режиме речь фактически идет не о кипении с парообразованием, а о кипении с так называемой "нестационарной передачей тепла" на нагрев воды. Поясним на примере. Дом может быть жилым с теплыми не пропускающими и не отбирающими тепло стенами из кирпича. Но в то же время тот же дом может быть нежилым с холодными долго прогреваемыми стенами из того же самого кирпича. В одном случае говорят об отоплении, в другом - о прогреве. А по сути вопрос стоит об отсутствии или наличии теплоаккумуляции - о "стационарной" или о "нестационарной" теплопроводности. Тема нестационарной теплопроводности воды с мощностями охлаждения на уровне сотен кВт/м² находится сейчас на острие науки в системах охлаждения ядерных реакторов.

Таким образом, реализуются два случая:

- на металл падает "пласт" воды, быстро охлаждает (с потемнением и хлопком в щелях) мелкопузырьковым кипением, после чего происходит пузырьковое кипение с шипением,
- на металл падает "капля" воды, от удара сплющивается на паровой подушке и инерционно разлетается брызгами со все стороны.



Взрывное вскипание



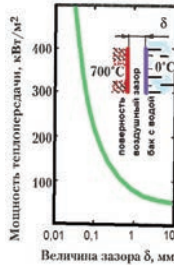
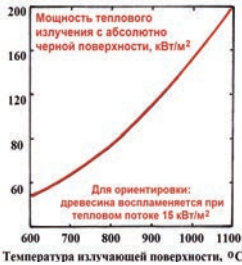
Вода обладает способностью перегреваться без кипения, а затем взрывным образом вдруг вскипать. Это известно, частности, в быту по вскипанию крутого кипятка в стеклянной колбе при добавлении в него чая. Перегретость воды - это штатный случай в природе. Кипящая вода тоже всегда перегрета. Однако, вскипание отличается от кипения тем, что способно создать скачок избыточного давления. Явление вскипания наиболее хорошо изучено в случае разрушений сосудов с перегретой жидкостью под давлением, но изучается и при атмосферном давлении, например, как взрыв быстроперегретых капель.

Модель вскипания перегретой воды мыслима и для банных камней, когда на фоне шипений кипящей воды возникает акустический удар. Попавшая в окружение раскаленных поверхностей вода (именно вода не кипящая, поскольку вода кипящая в узкие тупики не проникает) начинает интенсивно нагреваться и перегреваться за микросекунды так, чтобы микропузырьки пара в воде (а тем более пленка пара) не успевали образоваться. Перегреву способствуют чистая вода, крупность камней и их гладкая поверхность. Перегретая вода в критический момент вскипает, но поскольку она вместе с паром зажата (инерционно или стенками), то не успевает расширяться. Давление растет, и происходит взрыв с разлетом воды (брызг) и пара ("холодного"). Если, к примеру, воду удалось бы гипотетически перегреть до T_{700} (передав ей 600 кал/г), то теплоты перегрева хватило бы на испарение всей массы воды (539 кал/г). При этом создалось бы давление более 1000 атмосфер с характерным звуком расширения пороховых газов при винтовочном выстреле.

В действительности же, звук хлопка в каменке обычно похож больше на звук воды, выплеснутой из ведра на сухой асфальт (только с шипениями). Это звук рукоплескания - хлопка в ладоши, когда между поверхностями быстро образуется сжимающийся объем воздуха. А звук ухания похож на хлопок полусжатыми ладонями. На траве такого всплеска воды из ведра не слышно. Нет его и при ударе пальцем по ладони.

Так что хлопок в каменке скорее всего является шлепком воды о поверхность камня с выходом сжатого пара. Этот звук для банщиков является самым лучшим звуком на свете. Это форма коммуникации с каменкой - это ее аплодисменты в знак одобрения броска воды.

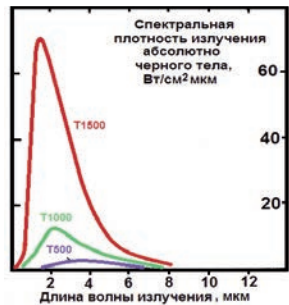
Тепловое излучение



Тепловым излучением называется световое излучение в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне, не видимо глазом. Поверхность начинается угадываться в темноте коричневым цветом при T600 и отчетливо видно при T800 как красный цвет каления металлов (хотя и при T800 основная доля оптического излучения приходится на невидимый диапазон спектра).

Высокая температура камней определяет значительную роль теплового излучения как в объеме каменки, так и в парильном помещении. Величины лучистых тепловых потоки могут становиться сопоставимыми с типичными уровнями теплопередачи от воздуха к бакам с водой

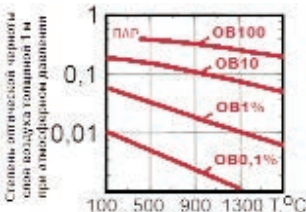
Способность материала поглощать тепловое излучение определяется коэффициентом поглощения (для отдельных длин волн излучения) или степенью черноты (для всего спектра излучения целиком). В случае воды тепловое излучение поглощается полностью даже в тонких слоях порядка долей миллиметра.



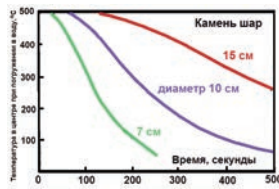
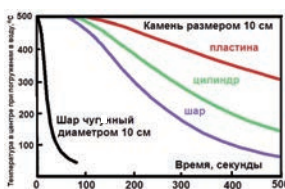
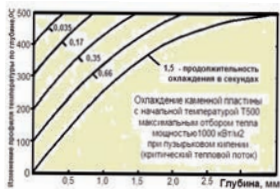
По расчетным оценкам слой воды испаряется от лучистого тепла в каменке со скоростью не более 0,1 мм/сек. Это означает, что капля воды размером более десятой миллиметра испариться за 1 секунду в каменке от лучистого тепла не может. Однако, та же капля воды размером 0,1 мм по расчетной оценке может испариться за 1 секунду от перегретого пара каменки T400 при давлении 1 атм, а в помещении бани за 1 секунду при T100/OB50 не может.



Молекулы воды в воздухе тоже поглощают тепловое излучение. Слой пара толщиной 1 м при T100 задерживает половину излучения черного тела. А слой воздуха толщиной 1 м с T100/OB10 задерживает порядка четверти излучения.

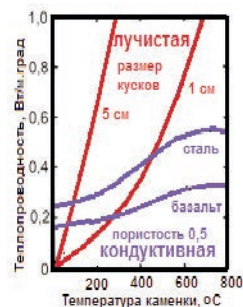
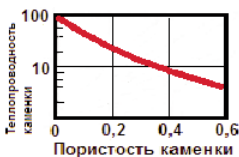


Охлаждение камня



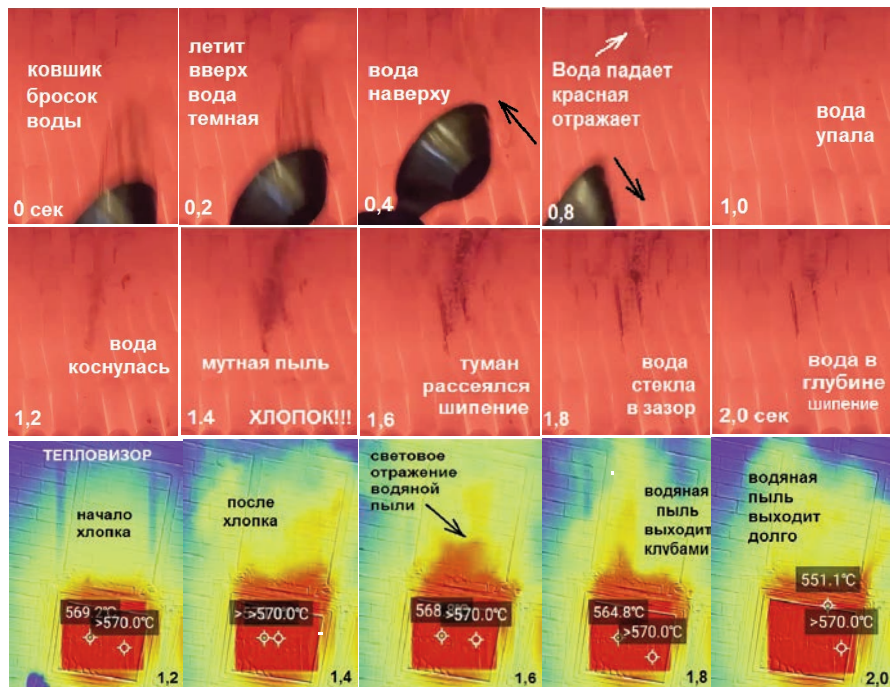
При контакте с водой раскаленные камни неизбежно остывают. Парообразование затормаживается, а перегрев получаемого пара снижается. Поэтому большое (если не главное) значение имеет равномерное распределение воды по всем камням каменки и даже по всем поверхностям камней. Если же вода попадает только на выборочные участки отдельных камней, то основной задачей является быстрое восстановление температуры остывших участков за счет поступления тепла как из внутреннего объема самого камня, так и из соседних камней. Ведь даже огромная теплоаккумулирующая каменка может в принципе стать неработоспособной, если долго капать в одно и то же место.

Особенно быстро охлаждаются шарообразные камни, поскольку внутри себя содержат мало теплоаккумулирующей массы. И чем мельче камни, тем быстрее они остывают. Поэтому если лить воду на слой мелких камней, то все тотчас остынет словно песок (как из-за малой теплоемкости отдельных песчинок, так и из-за малой теплопроводности мелкозернистого слоя). Так что идеальным случаем является диспергированная (капельно-душевая, аэрозольная или даже паровая) подача воды на крупные камни.

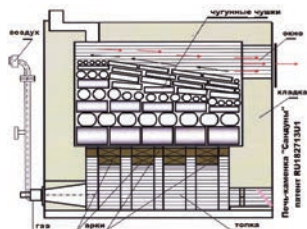


Кондуктивная теплопроводность каменки (за счет точек касания камней и за счет передачи тепла через воздушные промежутки) сильно зависит от пористости - отношения объема пустот к общему объему. Так при пористости 0,5 кондуктивная теплопроводность каменки по расчетным оценкам составляет лишь двадцатую часть от теплопроводности самих камней (вне зависимости от материала камней). Передача тепла увеличивается за счет конвекции между камнями и особенно за счет лучистой теплопередачи между крупными камнями.

Вода на раскалённом чугуне



Падение воды на раскаленный докрасна чугун приводит к взрывному испарению, видимо, с выбросом аэрозоля (водяной пыли). Даже малые количества воды при этом мгновенно охлаждают поверхность чугуна. После хлопка температура чугуна постепенно восстанавливается. Нет ясности, вся ли вода испарилась при хлопке. Но выход водяной пыли после хлопка фиксируется тепловизором долго - видимо, длительное шипение свидетельствует о продолжении пузырькового кипения.



Охлаждение чугуна во время хлопка происходит точечно, видимо, из-за шероховатости поверхности чушек. Вода активно скатывается (выдавливается) вниз даже через узкие зазоры между чушками. Поступление воды в зоны раскаленных глубинных слоев обеспечивает лучший прогрев пара. В связи с этим, каменки с "сандуновской" поверхностной укладкой мелких чушек обычно дают более низкую температуру в парильной, нежели каменки с крупными чушками, уложенными "как попало".

Веник как опахало



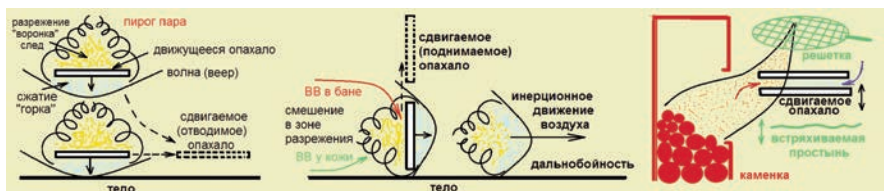
Анализ движений воздуха от веника (опала) базируется на схеме обтекания тела потоком воздуха. При малых скоростях тело ламинарно обтекается, при средних - тело расталкивает воздух и создает за собой разрежение, при больших - тело рассекает как кнут. Если перенести это в движущуюся систему координат, то становится понятно образование у гребного весла спереди "горки", сбоку "волны", а сзади "воронки-углубления".



Наиболее важным для бань случаем является движение веника вертикально вниз на тело парующего человека. Веник толкает перед собой воздух (напором-горкой), а сзади образует "пустоту", которую спешат заполнить газы со всех сторон, в том числе и горячие сверху из пирога пара.

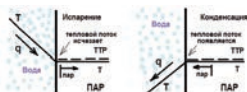
Так, махнув ладонью к лицу мы почувствуем основные этапы - сначала (1) слабоощутимый фронт толкаемого воздуха, затем (2) шлепок ладони (а веник шлепает не только листьями, но и высоковлажным горячим воздухом внутри себя), потом (3) дуновение периферийной волны расталкиваемого воздуха (веера), которая достигает кожи лишь после прохождения ладони мимо лица. Если же ладонь при приближении к телу отводится в сторону (или два сближенных параллельно опускающихся веника разводятся в стороны), то происходит самое главное - поток воздуха с тыла ладони по инерции устремляется вперед.

Если веник движется вдоль тела и вдруг сдвигается в сторону, то воздух с тыла продолжает движение по инерции вперед вдоль тела в виде "клуба". Поскольку именно в тыл веника в разрежение поступал горячий воздух из бани, то комфортная "тепловая дальность клуба" свидетельствует о легкости пара в бане (шпаркий пар "кусает" локально). Если же надо перемешать пар из каменки с воздухом бани (не "размазывая" горячий пар по стенам), желательно использовать деликатные локальные "помахивания взад-вперед", например, встряхивая растянутую горизонтально простыню под слоем пара. Также ясно, что отводимый от кожи веник засасывает в зазор под себя горячий воздух со всех сторон.



Конденсация пара

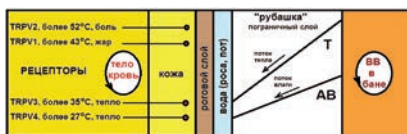
В основе явления лежат молекулярные процессы газификации (вход молекул в пар) и ожигения (выход молекул из пара). В одну секунду происходят миллионы актов газификаций и ожигений. Это сложные процессы, затрагивающие образование в воде кластеров, а в паре зародышей. Так, ароматические соединения создают запах в воздухе преимущественно при перегонке с водой, образующей, видимо, легкогазифицирующиеся с ароматикой комплексы-ассоциаты типа $(H_2O)_n$. Дисбаланс между скоростями газификации и ожигения называется испарением или конденсацией (осушкой или увлажнением).



Конденсацию пара прежде всего ассоциируют с нагревом кожи. Но конденсация - это лишь фазовый переход пар-вода.

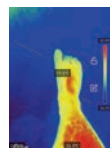
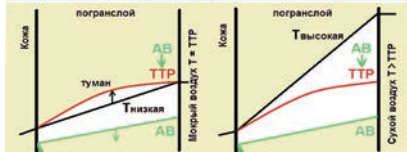
Греет скрытая теплота конденсации, выделение которой проявляется математически как изменение теплового потока. В процессе конденсации будем иметь лишь капли воды на поверхности и поверхностные градиенты температуры. Так, если в чистом паре принудительно охладить поверхность ниже T_{100} , то пар, конденсируясь, создаст около поверхности "вакуум", куда устремятся потоки пара. Эти потоки будут ограничиваться лишь техническими возможностями охладить поверхность.

При появлении в паре воздуха (неконденсирующегося газа) картина резко усложняется и до сих пор изучена недостаточно. Дело в том, что при конденсации пара пристеночный воздух не удаляется, вследствие чего у поверхности создается пограничный слой воздуха ("рубашка"), через которую будут вынуждены диффундировать молекулы пара. Поскольку скорости диффузии ограничены, то и скорости конденсации пара из влажного воздуха на порядки ниже, чем в случае чистого пара.



Первичные оценки тепломассопереноса в погранслое можно производить по известной методике определения точки росы в стене здания. По графику АВ строят график ТТР и сопоставляют его с графиком температуры. Тем самым выявляется возможность образования тумана в конкретном погранслое (тепловизионные ореолы вокруг тела общеизвестны).

Постулаты модели - роса осаждается из прикожного воздуха с $T = TTR = T_k$, то есть роса имеет температуру кожи. Но сама кожа нагревается за счет потока тепла из погранслоя.



Даже самые древние технологии имеют свою теорию

**В обзоре рассматриваются
физические явления в паровой бане.
Инженерные и гуманитарные вопросы
не затрагиваются.
Издание носит полемический характер.
Не является предметом консенсуса.**

*Авторы признательны Ю.В.Алексееву, К.В.Белому,
К.Е.Бессонову, И.В.Васильеву, В.А.Волкову, В.Г.Гребенкину,
С.Н.Калинину, Е.В.Колчину, Н.И.Котлову, М.М.Куткину,
В.С.Куценко, В.Н.Ляхову, В.В.Маслоу, С.В.Мордашову,
Н.Н.Петрову, А.З.Петрушову, А.В.Полунину, В.В.Селивану,
М.А.Сергееву, А.П.Ферингеру, М.К.Хаирову, R.Rackauskas
за полезные обсуждения по тематике паровых бань.*

Древнейшее понимание праславянского термина "пар"
(«prtъ=паръ=пАра»)

- это ощущение тепла, в том числе и животного телесного.

Такое чувственное понятие давно уже стало забываться как устаревшее - его осколки сохраняются лишь в простонародном языке: парное молоко, парить тело (прогревать «до костей»), солнце парит, испарина (пот).

Поздравление "С лёгким паром!" до сих пор не забывается и бережно сохраняется как национальное гуманитарное достояние, как отличительная черта русского народа, поскольку больше нигде в мире не поздравляют людей с жаром в теле после горячего омовения в парной бане.

Это является именно поздравлением, а не приветствием, поскольку сопровождается традиционным ответом "Спасибо!".

Причем поздравляют не в бане, а непосредственно при выходе из бани, потом уже не поздравляют. Совсем голого и мокрого не поздравляют. Если есть одежда, то она должна быть сухой.

Не поздравляют вышедшего из парилки в моечное отделение. Баня может быть расположена вдали от дома, но поздравляют либо при выходе из бани, либо при вхождении в дом. Выходя вместе из бани, друг друга не поздравляют. Поздравляют третьи лица, не участвовавшие в банном действии... Такие милые условности неписанно передаются в быту "генетически" из поколения в поколение.

В настоящее время термин ПАР потерял былое живое понимание и приобрел современный смысл газообразного состояния вещества.