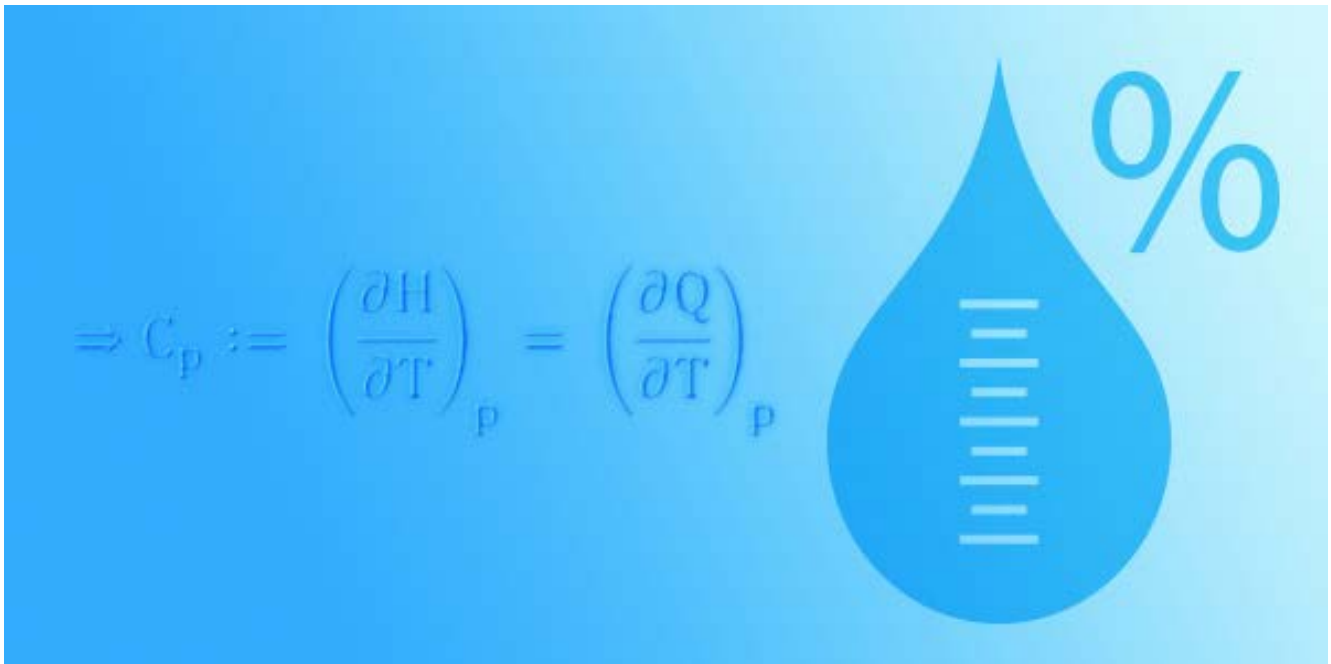


Влажность воздуха в помещении – термодинамика и энтальпия



Введение

Что такое “влажный” воздух, когда и почему он становится “сухим”, сколько тепловой энергии он содержит и как это всё связано с определённой энтальпией (теплосодержанием)? О природе и взаимосвязях влажности воздуха в помещении мы можем узнать из законов термодинамики. Каждый, кто смог разобраться в этом совсем не простом предмете, знает, например, о том, как температура конденсации воды используется в испарительных охладителях, может сходу объяснить понятие температуры шарика смоченного термометра и прекрасно понимает изэнтропические изменения состояний, не говоря уже о способности точно интерпретировать диаграмму h-x без объясняющего видео.

Однако сегодня кондиционеры, системы ОВКВ или повторного охлаждения часто проектируются с помощью компьютерных программ. Опасность этого в том, что экспертные знания о термодинамических

свойствах влажности воздуха, наработанные проектировщиками или инженерами-технологами, начинают всё больше забываться. Иногда в повседневной рутине просто не хватает времени, чтобы подумать об энергетически эффективной альтернативе.

Но если глубже обдумать технологию кондиционирования или работу устройства вторичного охлаждения, возможно, удалось бы найти способ сберечь несколько киловатт энергии для охлаждения? Может быть тогда система охлаждения вообще стала бы излишней? Особенно это касается охлаждения в диапазонах предельных температур. При правильном понимании возможностей адиабатического охлаждения и новых возможностей восстановления влажности это реально. Здесь знания термодинамики помогают “правильно” работать с влажностью воздуха в помещении.

Физиология человека

В отличие от температуры мы не можем сразу почувствовать само изменение относительной влажности, лишь только его последствия. Если относительная влажность слишком низкая (намного ниже 30%), то спустя некоторое время мы начинаем чувствовать сухость наших слизистых оболочек и кожи. Если же она слишком высокая, мы ощущаем духоту и в какой-то момент начинаем сильно потеть. Температура тела здорового человека составляет примерно 37 °С. Поскольку окружающая температура обычно ниже, мы постоянно отдаём тепло. Второй закон термодинамики гласит: “Тепло никогда само по себе не передаётся от более холодного тела к более тёплому”.

Это означает, что теплопередача нашего тела основана на принципах физики – “теплопроводности”, когда мы вступаем в контакт с более холодными поверхностями, “конвекции”, когда воздух соприкасается с нашей кожей, или “лучистого теплообмена” между поверхностями с разной температурой.

Помимо одежды мы можем регулировать свою температуру и иным способом, главным образом с помощью испарения влаги через кожу. Это испарение происходит за счёт процесса конвекции. Когда воздух, ещё не достигший точки насыщения, вступает в контакт с кожей, он может поглощать водяной пар, отдаваемый телом. Поэтому когда влага нашего тела испаряется за счёт нашего же тепла через поры и пот поглощается воздухом, мы ощущаем этот процесс как потерю тепла, мы чувствуем изменение температуры, нам становится холодно. Когда через нашу кожу испаряется один килограмм воды, тело теряет почти 700 ватт в час, то есть примерно 600 килокалорий. Сухой тёплый воздух поглощает отдаваемый нами водяной пар, что приводит к его быстрому испарению с поверхности кожи. Именно это происходит, когда мы идём в сауну. Мы легко можем выдержать температуру 90 °С при очень низкой относительной влажности, потому что какое-то время тело само себя охлаждает. Однако если бы относительная влажность в комнате при той же температуре была 100%, как в парилке, мы бы не продержались там и минуты без риска для жизни.

Влажность, температура, давление и диаграмма Молье

Помимо теплопроводности, излучения, конвекции и одежды, температура и влажность воздуха в помещении играют определяющую роль для комфорта и самочувствия человека. Так как обе эти переменные

зависят друг от друга и важны для нашего тела, мы даже немного ощущаем “энтальпию” (сокращённо “h”) окружающего воздуха. В сфере кондиционирования этим термином определяют количество тепла, поступающего или удаляемого из воздуха при определённом процессе. В теле происходит то же самое. Оно ощущает содержание тепла в окружающей нас воздушно-водяной смеси. При наличии отклонений мы бессознательно пытаемся адаптировать тепловой баланс тела к энтальпии воздуха, чтобы сохранить здоровую температуру тела. Но что происходит, когда температура и влажность меняются?

Мы все можем представить, что означает фазовая переменная температуры. Однако с влажностью воздуха дело обстоит немного сложнее. Влажность означает долю водяного пара – т.е. не капель, тумана, дождя или льда – в газовой смеси в помещениях или в воздухе, которым мы дышим. Эта доля зависит от температуры и давления воздуха. Например, определённый объём воздуха может поглотить точно определяемую массу водяного пара, измеряемую в граммах водяного пара на килограмм сухого воздуха. Эта величина выражает абсолютную влажность и обозначается символом “x”. Если воздух насыщен, это называется точкой насыщения или точкой росы. Тогда он больше не может поглощать водяной пар, и относительная влажность “φ” равна 100%. В природе такое состояние почти не встречается. Поэтому при изменении температуры или давления процентное содержание водяного пара в воздухе колеблется между 0 и 100%. В сфере кондиционирования эта величина исключительно важна. С одной стороны она наряду с температурой предоставляет информацию об уровне комфорта в помещении. С другой стороны, она позволяет рассчитывать процессы и определять количество энергии, необходимой для испарения и конденсации. Взаимосвязь сложная, но поддаётся расчёту. Поэтому компьютерные программы могут помочь смоделировать адиабатические и изотермические процессы увлажнения воздуха в помещениях или системах вентиляции. Адиабатический процесс означает распыление и испарение воды при постоянной температуре. При этом мельчайшие капли воды моментально превращаются в пар, а необходимая для этого тепловая энергия берётся из окружающего воздуха. Возникает эффект охлаждения. При изотермическом увлажнении вода нагревается до точки кипения и достигает энтальпии $h = 419$ кДж/кг. На уровне моря она затем испаряется при давлении 1,013 мбар и температуре 100 °С.

Рихард Молье, профессор прикладной физики и инженерной механики в немецких университетах Гёттингена и Дрездена (с 1897 по 1931), в начале 20 века определил взаимоотношения фазовых переменных температуры, абсолютной и относительной влажности, давления водяного пара, энтальпии и плотности. Без помощи компьютера он смог составить диаграмму h-x для влажного воздуха, которая позднее была названа в его честь. С помощью этой диаграммы можно легко проиллюстрировать изменения состояния влажного воздуха, такие как нагрев, охлаждение, увлажнение, высушивание и смешивание, и быстро вывести тепловую мощность, требуемую для кондиционирования воздуха. Давайте рассмотрим это на простом примере.

Эффект испарительного охлаждения

Тёплым летним днём воздух на улице с температурой 32 °C и относительной влажностью 40% (точка 1 на диаграмме h-x, рис. 1) долгим и сильным дождём адиабатически увлажняется до (теоретически) 100% относительной влажности (точка 2, рис. 1). Он может поглотить 4,5 г воды на кг воздуха; абсолютная влажность (абсцисса) повышается с 12 до 16,5 г/кг. При этом температура воздуха падает до 22 °C (ордината). Сегодня этот принцип испарительного охлаждения используется в технологиях вентиляции и кондиционирования для увлажнения тёплого воздуха и его охлаждения без использования механики. Ещё лучше этот охлаждающий эффект можно продемонстрировать с помощью температуры смоченного термометра. Это самая низкая температура, которой можно достичь испарением как функцией относительной влажности. Рис. 2 позволяет нам проверить, достигается ли тот же результат при указанных выше климатических условиях до и после летнего дождя.

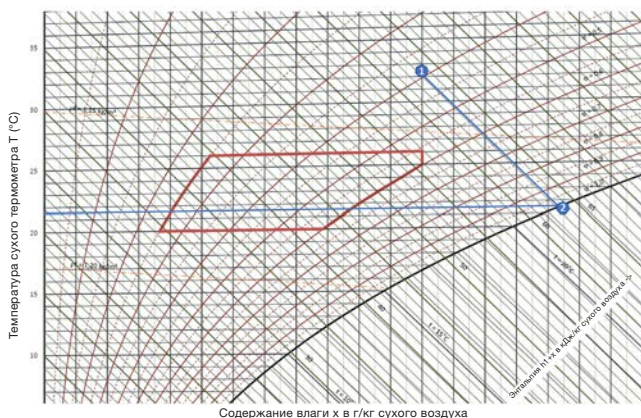


Рис. 1: Испарительное охлаждение на диаграмме h-x. При увлажнении воздуха на улице (32 °C, 40%) до почти 100% влажности его температура падает по изэнтальпе почти на 10 К до примерно 22 °C, т.е. без поступления теплоты испарения (диагональные линии на диаграмме). (рис. Dialog GmbH)

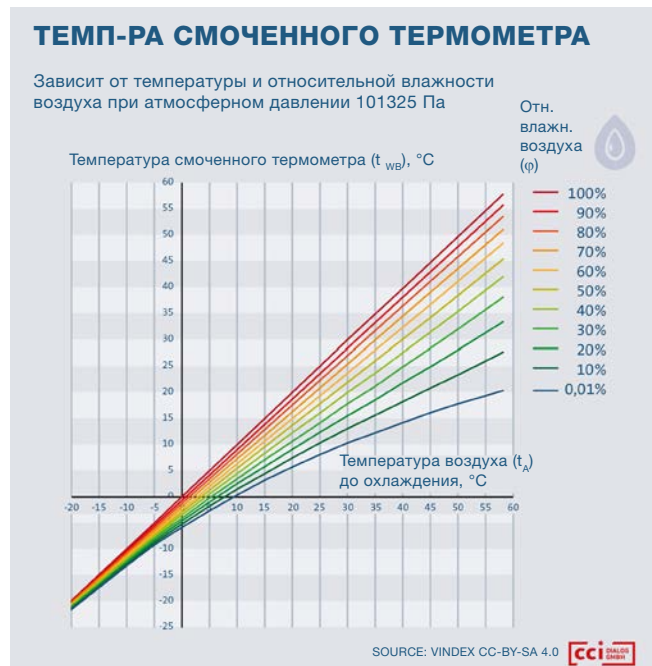


Рис. 2: Температура смоченного термометра показывает максимально возможное охлаждение при данной температуре и относительной влажности воздуха, в данном случае на уровне моря. (рис. Dialog GmbH)

Расчёт важен, но знание на вес золота

Благодаря диаграмме Молье проектировщик или инженер систем вентиляции может проверить, правильно ли рассчитана система увлажнения или влагоудаления. Диаграмму, показанную на рис. 3, можно применить для офисного здания “The Squire” на станции скоростных поездов в аэропорту Франкфурта. Здание, насчитывающее 140 000 м² площадей под офисы, конференц-залы, гостиницы, магазины и рестораны, оборудовано системой вентиляции и кондиционирования с охлаждением подаваемого воздуха. Наружный воздух состояния 1 (32 °C, 40% ОВ, h = 62,5 кДж/кг) поступает в блок кондиционирования и там фильтруется. Затем свежий воздух охлаждается для подачи в помещения (состояние 2) в двух связанных теплообменниках с замкнутым циклом (CCS).

Вода, выходящая из теплообменника CCS в центральном блоке отводимого воздуха при 21,5 °C, охлаждается до 13 °C в промежуточном теплообменнике с помощью холодной воды 10 °C (из блока охлаждения). Эта вода сначала проходит через теплообменник 2, а затем через теплообменник 1 в блоке подаваемого воздуха, прежде чем вернуться в центральный блок отводимого воздуха с температурой 28 °C. В результате этого уличный воздух охлаждается и осушается с 32 °C до состояния 2 с 15,5 °C, влажностью 10 г/кг и энтальпией 40 кДж/кг. После следования через последующие фильтры и

вентиляторный блок (температура повышается на 1,5 К), поступающий воздух в состоянии 3 с температурой 17 °С, ОВ = 82% и энтальпией $h = 41,5$ кДж/кг, подаётся в комнаты здания. Затем отводимый воздух, нагретый до 26 °С (состояние 4) снова идёт в центральный блок отводимого воздуха и после фильтрации проходит через систему адиабатического испарительного охлаждения. При этом он увлажняется почти до 100% ОВ и охлаждается до 18,5 °С ($h = 52$ кДж/кг) (состояние 5). Этот воздух затем охлаждает тёплую воду 28 °С в теплообменнике отводимого воздуха системы CCS до 21,5 °С. Наконец, отводимый воздух с температурой примерно 26 °С (состояние 6) выходит наружу.

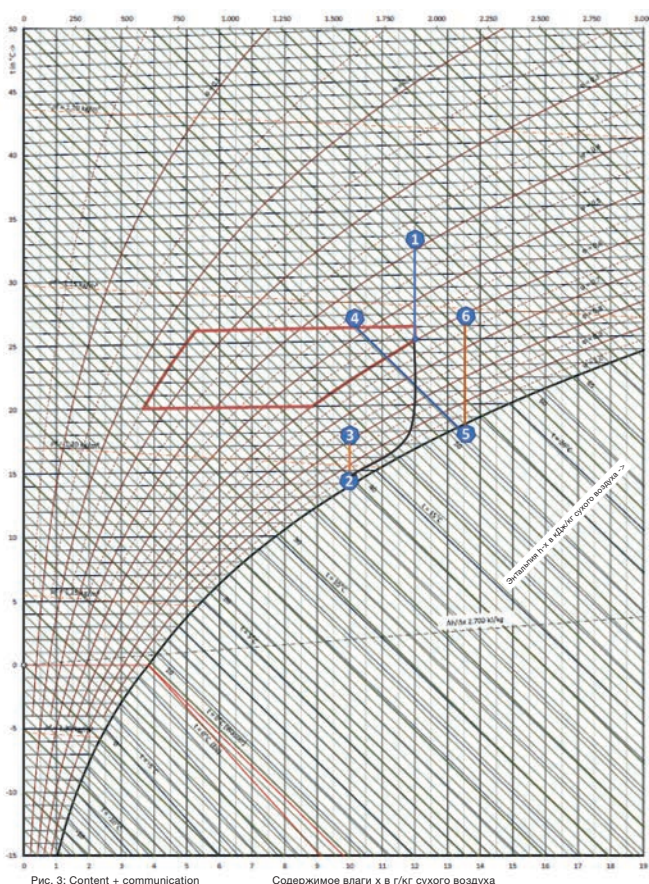


Рис. 3: диаграмма h-x, иллюстрирующая обработку поступающего (1 - 3) и отводимого воздуха, вкл. адиабатическое испарительное охлаждение летом (4 - 6). Нижняя часть рисунка иллюстрирует связь блоков поступающего и отводимого воздуха с системой восстановления тепла замкнутого цикла.

Зимой технология работы систем ВКВ остаётся той же, но изменяются некоторые рабочие параметры: теперь воздух снаружи имеет температуру -12 °С и ОВ = 90%. Заданная температура поступающего воздуха, обрабатываемого в центральных блоках кондиционирования, остаётся 17 °С даже зимой. Адиабатическое испарительное охлаждение в блоках отводимого воздуха отключается. Вместо этого

используется вода из центрального отопления с температурой 85 °С, чтобы довести воду в системе CCS до максимальной температуры 60 °С и нагревать поступающий воздух. Если снаружи воздух слишком сухой, он увлажняется в блоке поступающего воздуха. Кстати, системы рекуперации влажности, такие как мембранные теплообменники или сорбционные роторы, являются альтернативой активному увлажнению в блоках вентиляции. Они извлекают тепло и большую часть влаги из отводимого воздуха, а затем передают их в поступающий воздух. Преимущество такого процесса: каждый грамм пара сохраняется, и его не нужно специально генерировать, что не только сберегает энергию, но и снижает затраты и выбросы CO₂. Однако регулировать его сложнее, чем активное увлажнение.

Точные измерения

Приборы Testo для измерения температуры и влажности прекрасно подходят не только экспертам, но и проектировщикам, инженерам или операторам систем для проверки всех параметров и точных величин влажности, температуры или точки росы в жилых зонах, производственных, складских и серверных помещениях, а также в музейных запасниках и на холодильных складах. Например, если к прибору testo 400 подключить зонд влажности, он кроме температуры и влажности может измерить точку росы, абсолютную влажность и температуру смоченного термометра.



Рис. 4: Точный измерительный прибор testo 400 может определить или рассчитать большое число термодинамических параметров, включая температуру смоченного термометра.

Знаете ли вы?

В завершение серии статей Testo о влажности воздуха в помещении мы собрали ещё ряд фактов по всей этой теме. Они дадут вам общее представление, но могут пригодиться и в повседневной работе.

- Для испарения 1 литра воды с начальной температурой 20 °С при 100 °С (1,013 мбар) требуется примерно 700 ватт энергии.

- Зимой абсолютная влажность воздуха на улице примерно 2 г/кг при -8 °C, а относительная влажность 100%. Если этот воздух нагреть до 22 °C, в нём останется только 12% относительной влажности. Такой воздух слишком сухой для человека, поэтому его нужно увлажнять.
- Летом же воздух в Германии при 20 °C в среднем имеет относительную влажность 60% и абсолютную влажность 8,5 г/кг. Для объёма 150 м³ это примерно 2 литра воды в воздухе. Если температура воздуха падает до 0 °C, например, при его попадании в холодильную камеру, более 50% этой воды выступает в виде росы или может вызвать формирование ненужного льда.

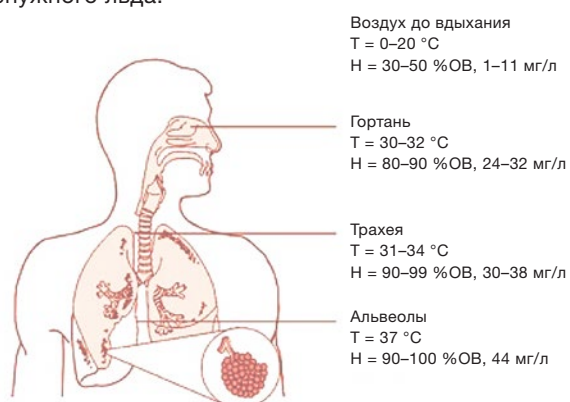


Рис. 5: Источник: информационный листок: "Luftbefeuchtung" [Увлажнение воздуха]; EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE [Швейцарское федеральное управление по энергетике], 2016.

- У каждого здорового человека есть собственная система кондиционирования, где вдыхаемый воздух всегда увлажняется на слизистых оболочках во рту, носу, горле, трахее и бронхах до максимально возможной относительной влажности 100%, прежде

чем попадает в альвеолы.

- Когда относительная влажность падает ниже 20%, иммунная защита слизистых оболочек даёт сбой, потому что их функция самоочистки и удаления бактерий и вирусов замедляется, а затем полностью останавливается.
- Напротив, при относительной влажности порядка 50% вирусы и бактерии живут не дольше нескольких минут. Если эта величина резко падает, время их жизни повышается до двух дней, и патогены в оболочке из соляной корки остаются в воздухе. При величинах намного больше 60% микробы могут долго оставаться заразными, но в воздухе держатся недолго и затем падают на землю.
- При чихании и кашле частицы или патогены выбрасываются из лёгких через дыхательные пути с силой урагана, иногда со скоростью звука.
- В среднем люди проводят до 90% своего времени в закрытых помещениях, т.е. в искусственном микроклимате.
- При любой физической активности люди выделяют в воздух от 50 до 200 г воды в час. При готовке, стирке и принятии душа испаряется до 1500 г воды. Сильнейшие спортсмены во время соревнований теряют от 2000 до 3000 г воды.
- На рабочем месте большинство сотрудников ощущает воздух как слишком сухой, когда его относительная влажность падает ниже 30%. Эта цифра стала результатом двухлетнего исследования значения влажности в офисе, проведённого институтом Фраунгофера по промышленному инжинирингу и организации труда.



Рис. 6: (Источник: "Влажность воздуха на рабочем месте в офисе"; Институт Фраунгофера по промышленному инжинирингу и организации труда IAO, Штутгарт, 2014)