

ЛАМЕЛЕВЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ: Неприятная правда III. Температура поверхности охладителя



Рис.1. Ламелевый теплообменник – испаритель прецизионного кондиционера.

Vojtěch Harok, Lloyd Coils Europe s.r.o.

Мы посвятили серию статей [3,5] использованию ламелевых (трубчато-реберных) теплообменников в центральных кондиционерах (AHU), приточных установках, вентиляционных системах и прецизионных кондиционерах. В некоторых странах, таких как Чехия и Россия, существует целый ряд мифов и поверий, которые приводят к ошибкам и недоразумениям. В предыдущих статьях мы рассматривали процессы со стороны жидкости и основы теплопередачи на стороне воздуха, в том числе влияние конденсата на потери напора воздуха. Данная статья последняя из этой серии рассказывает о самом главном. Называется это: температура поверхности охладителя.

Быстрый и бешеный

Представьте себе, что у вас параметры воздуха на входе в теплообменник 32°C / 40% (относительная влажность) и вам нужно охладить его до 21°C с помощью испарителя или водяного охладителя. Какая будет влажность и энтальпия воздуха? Какой источник холода нам потребуется? Большинству инженеров будет ясно: «Нужна теплота поверхности охладителя 9°C. Найду на кривой насыще-

ния точку, которая соответствует температуре 9°C. Соединю эту точку с точкой, соответствующей состоянию воздуха на входе. На пересечении этой прямой с горизонталью 21°C лежит искомая точка – состояние воздуха после охладителя (см. рис. 2)». Хотя этот способ и быстрый, однако, может привести к ошибке: в действительности производительность охладителя может отличаться на десятки процентов.

Что такое температура поверхности охладителя

Когда влажный воздух встречается с поверхностью, температура которой ниже, чем точка росы, на поверхности начинает высаживаться влага. Поэтому очень важно знать температурное поле на поверхности охладителя. Как оно выглядит и как его определить?

В трубках теплообменника к центральной части потока

хладагента тепло переходит от той части, которая ближе к стенам, к которой, в свою очередь, тепло переходит от внутренней стороны стенки трубки.

К трубке тепло передается от внутренней стороны вортничка ламели и к тому, в свою очередь, с ближайшей области поверхности ламели. Имеется в виду перенос тепла, и на практике для качественно изготовленных теплообменников с медными трубками и алюминиевыми ламелями составляет этот поток всего 1 - 2% от всего теплотокана. Это соответствует разнице температур примерно 0,5 К, чем на определенном этапе наших расчетов обычно пренебрегают.

Ламели охлаждаются воздухом, проходящим через теплообменник. Прохождение потока воздуха через ТО – процесс сложный: воздух не просто «проскальзывает» между трубок (за ними есть область с сильной турбулентностью), порой он должен также двигаться в обратном направлении, так как в большинстве ТО сейчас используются гофрированные или прорезанные ламели. Наблюдать температурное и скоростное поля поэтому сложная 3-х размерная задача.

Изобразить температуру поверхности ламели на порядок проще. Рассмотрим работу теплообменника, который работает в противотоке. В результате получим поле

подобное изображенному на **рис. 3а**:

- Температура поверхности разная в разных местах.
- Температура понижается в направлении основного течения воздуха.
- Температура поверхности зависит от локальной температуры хладагента.
- Температура поверхности зависит от соединения калачей.

В зависимости от локальной скорости воздуха в разных местах к передачи тепла ламелями доходит до эллипсоидного или каплеобразного разрыва температурного поля около трубок.

Доходит до неправильностей, которые могут быть вызваны многими факторами, включая движения капель конденсата.

Если мы пренебрежем факторами 4 - 6, получим модель течения воздуха,

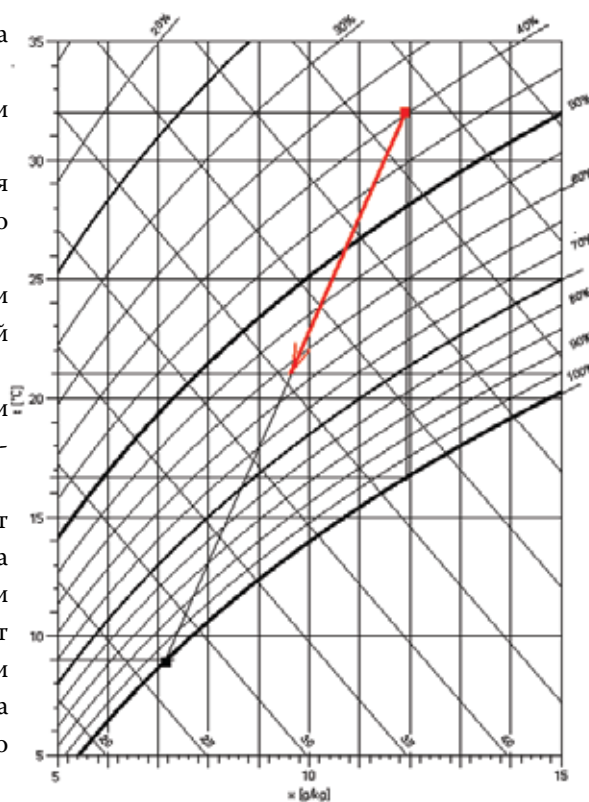
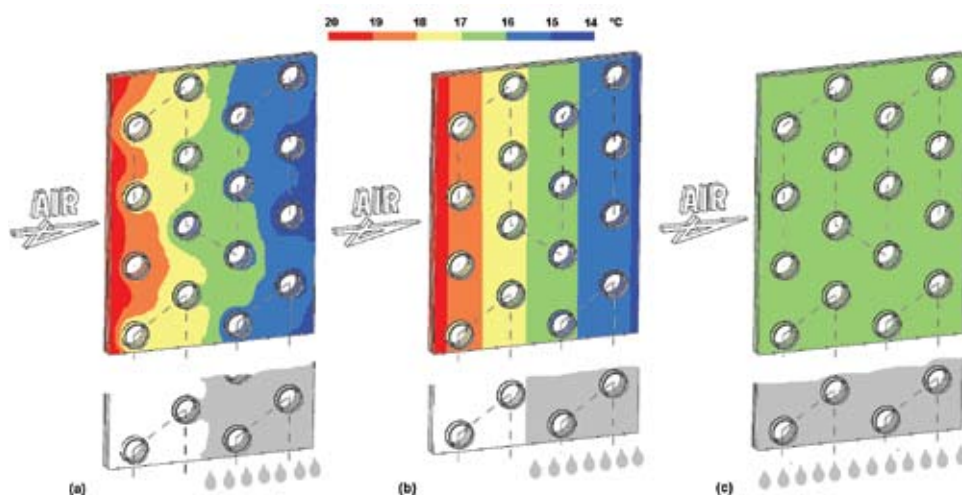


Рис.2. Распространенный способ расчета температуры поверхности охладителя, который может привести к большой ошибке.

Рис.3. Изображение температурного поля на поверхности охладителя (а) и его модель. Модель одномерного температурного профиля согласно нормам ARI 410 (а) и модель постоянной температуры поверхности охладителя (б).



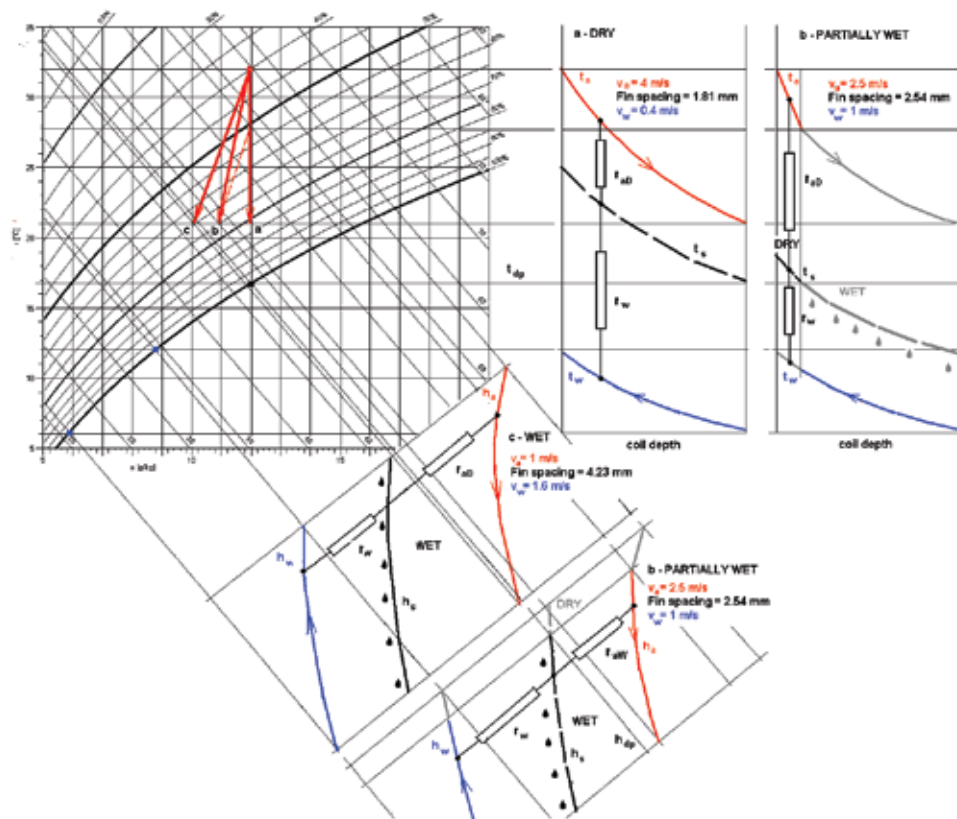


Рис. 4. Изображение изменения состояния воздуха, проходящего через охладитель. В левом верхнем углу изменение состояния изображено в Мольеровой диаграмме влажного воздуха. Остальные графики изображают профиль температуры или энтальпии воздуха (сплошная красная линия), температуры хладагента или энтальпии насыщенного воздуха, соответствующей температуре хладагента (сплошная синяя линия) и температуры поверхности или энтальпии (пунктирная черная линия). Для одного и того же состояния воздуха на входе и той же температуры сухого термометра воздуха на выходе поверхность охладителя может быть сухой (а), частично мокрой (b) или мокрой (c) в зависимости от соотношения температуры поверхности t_s и точки росы t_{dp} . В случае частично мокрой поверхности часть теплообменника рассчитывается как сухая, а другая часть как мокрая поверхность. Шаг ламелей в случае (а) равен 1,81 мм, в случае (b) – 2,54 мм, и в случае (c) – 4,3 мм, v_a – стандартная скорость воздуха и v_w – скорость воды в трубках. Ламели имеют геометрию 31 x 27 мм с шахматным расположением трубок, трубки имеют внутреннее рифление, внутренний диаметр трубки после расширения равен 12,5 мм.

который изображен на **рис. 3б**. Разброс температур можем потом изобразить кривыми на **рис. 4**. К этой модели мы еще вернемся в следующей главе.

Рисунок 3с изображает простую модель, которую мы упоминали во введении (рис. 2): Пока мы более менее выберем произвольно «температуру

поверхности охладителя», поверхность в большинстве случаев будет рассматриваться как 100% мокрая, единая и при одинаковой температуре. Не будем рассматривать постепенное охлаждение воздуха, а просто как смешение внешнего воздуха (который якобы прошел через ТО

неизменным) с насыщенным воздухом близко к фиктивной поверхности, см. **рис. 5**. Для объективности можем сказать, что для действительно мокрой поверхности эта модель работает, если модельную «температуру поверхности охладителя» определим не произвольно, а точными методами на основе параметров ТО на стороне воздуха и хладагента.

Расчетная модель согласно нормам ARI 410

В Соединенных Штатах в отличие от Европы производительность ТО для центральных кондиционеров (АНУ) и приточных установок соответствует программам расчета: производители ТО и др. оборудования пользуются нормами ARI 410 [1], методическим расчетом и сертификационной программой, которая гарантирует правильность общей производительности ТО +/-5%. Расчетная модель, основанная на подходе согласно **рис. 3б**, изображена на **рис. 4**.

В зависимости от того, какая температура точки росы воздуха на входе в ТО и температура поверхности охладителя, может возникнуть одна из следующих возможных ситуаций:

- а1. Теплообменник сухой.
- а2. Теплообменник влажный.
- а3. Поверхность теплообменника частично сухая, частично мокрая; скрытая теплота составляет менее 5% общей производительности.

б. Поверхность ТО частично сухая, частично мокрая.

с. Поверхность теплообменника мокрая.

В случаях б и с теплообменник активно высаживает влагу, происходит изменение агрегатного состояния воздуха, что на h -х диаграмме отображается наклонным участком.

В случае, когда ТО «влажный» (случай а2), на некоторых трубках и некоторых участках ламелей происходит конденсация влаги из воздуха. Капли конденсата однако будут находиться в состоянии балансирования между конденсацией и обратным испарением, например, стекая на соседнюю более теплую поверхность или уносясь с более теплым турбулентным потоком воздуха. В случае а3 также сложно определить количество конденсата, поэтому норма АRI 410 для случаев а1, а2 и а3 предписывает рассматривать в расчетах поверхность охладителя как сухую. Поэтому изменение состояния для данных случаев дано вертикальным отрезком.

Более интересным для расчетов является случай не частично сухого, а частично мокрого теплообменника; в климатических установках в Средней Европе такой случай происходит довольно часто. Расчет включает в себя определение соотношения сухой и мокрой части поверхности, изменение температуры поверхности и средней температуры воздуха, проходящего через теплообменник.

Определение изменения температуры поверхности охладителя

Теплообменник можно представить как ряд температурных сопротивлений в последовательном параллельном соединении, см. рис. 5. Потенциалом является температура или энтальпия воздуха и хладагента, током – переносимый поток тепловой энергии. Если предположим, что теплообменник имеет идеальную конструкцию, то на каждом бесконечно малом участке его будут два температурных сопротивления: Температурное сопротивление на стороне воздуха r_{aD} и соотв. r_{aW} и температурное сопротивление на стороне хладагента r_w . Температурные сопротивления определяем как:

$$r_{aD} = 1 / S_a \alpha_{aD},$$

$$\text{соотв. } r_{aW} = 1 / S_a \alpha_{aW}, \text{ и}$$

$$r_w = 1 / S_w \alpha_w,$$

где α_{aD} , и α_{aW} коэффициенты теплоотдачи на стороне воздуха, измеренные соответственно при сухой и мокрой поверхности, α_w – коэффициент теплоотдачи на стороне хладагента, S_a – вторичная поверхность теплообмена (ламели+воротнички) и S_w – первичная поверхность теплообмена (внутренняя стенка трубок). Согласно [2] коэффициенты теплоотдачи на стороне воздуха α_{aD} , и соотв. α_{aW} зависят от профиля ламели и скорости воздуха. Коэффициент теплоотдачи на

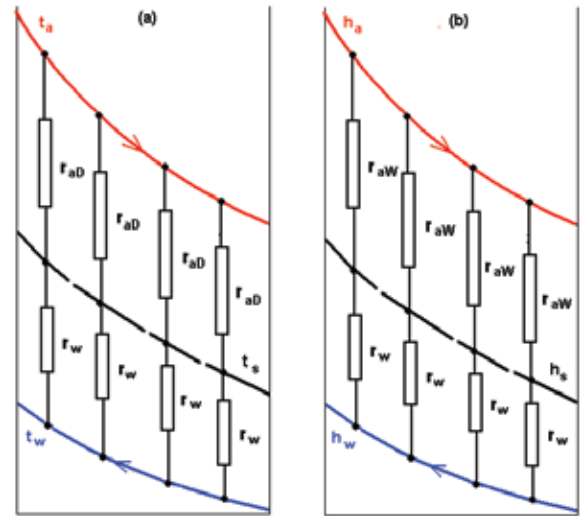


Рис. 5. Схема расчета изменения температуры поверхности охладителя для сухой (а) и мокрой (б) поверхности.

стороне хладагента зависит, помимо прочего, от скорости потока жидкости в трубках. (Для полноты добавим, что единицей температурного сопротивления является K/W в отличие от теплового сопротивления, которое обычно обозначают большой буквой R и измеряют в $m^2.K/W$)

Для сухого/мокрого теплообменника температура поверхности в любом месте описывается уравнениями:

$$t_s = t_w + [r_w / (r_{aD} + r_w)] \cdot (t_a - t_w), \text{ и}$$

$$h_s = h_w + [r_w / (r_{aD} + r_w)] \cdot (h_a - h_w),$$

где r_{aD} , и соотв. r_{aW} есть температурное сопротивление на стороне воздуха для сухой/мокрой поверхности, t_s и соотв. h_s – температура и энтальпия бесконечно тонкого слоя воздуха, прилегающего к ламели (температура поверхности и соотв. энтальпия), t_w – средняя температура хладагента в трубке в данном месте, h_w – энтальпия

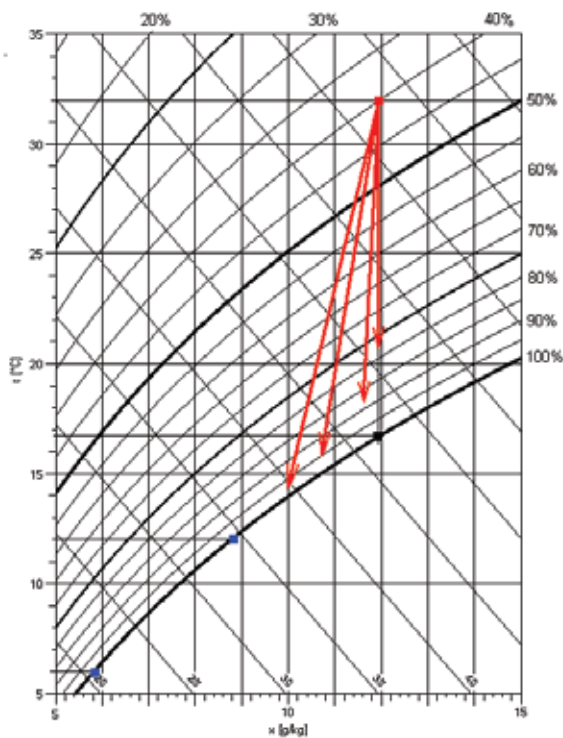


Рис. 6. Охлаждение воздуха в теплообменнике с увеличением количества рядов – увеличение производительности. Остальные параметры остаются постоянными: изменение температуры 30% пропиленгликолевого раствора 6/12°C, скорость в трубках 1 м/с, скорость воздуха 2,5 м/с, шаг ламелей 2,54 мм, сильно гофрированная ламель, геометрия 32 x 27, шахматное расположение трубок, внутренний диаметр трубки после расширения 12,5 мм.

насыщенного воздуха, соответствующая этой температуре, t_a , и соотв. h_a – средняя температура, и соотв. энтальпия воздуха между ламелями [1].

То, насколько будет «близка» температура поверхности к температуре хладагента или температуре воздуха, зависит от соотношения температурных сопротивлений на стороне воздуха и стороне хладагента. Лучшая теплоотдача на стороне воздуха повысит температуру поверхности, лучшая теплоотдача на стороне жидкости – наоборот, ее понизит.

Для теплообменника с частично сухой, частично мокрой поверхностью, сухая и мокрая части рассчитываются отдельно с тем, чтобы соблюдались пограничные условия на разделе сухой и мокрой частей.

Интенсивность осушения воздуха

Представим, что мы охлаждаем воздух от того же начального состояния до состояния с заданной температурой сухого термометра. Из соотношения, приведенного в предыдущей главе, можно вывести, что теплообменник будет меньше осушать воздух:

- при более высокой скорости воздуха, при большем количестве рядов, при меньшем шаге ламелей, при более выраженных гофрах ламелей;

- при более высокой температуре хладагента;

- в случае водяного ТО: при меньшей скорости воды в трубках, при меньшем падении давления на стороне воды, при худшей теплоотдаче в трубках, при высшей концентрации гликоля;

- в случае испарителя: для гладкой трубки, при худшей теплоотдаче на стороне хладагента, слишком высокая или слишком низкая проектная скорость хладагента.

Теплообменник будет больше высаживать влаги:

- при низкой скорости воздуха, при меньшем количестве рядов, при большем шаге ламелей, при плоской ламели;

- при низкой температуре хладагента;

- в случае водяного ТО: при большей скорости воды в трубках, при большем падении давления на стороне воды, при лучшей теплоотдаче в трубках, при низшей концентрации гликоля;

- в случае испарителя: для рифленной трубки, при лучшей теплоотдаче на стороне хладагента, оптимальная проектная скорость хладагента.

Применение: теплообменник с разным количеством рядов

Если будем иметь постоянными все параметры теплообменника, включая шаг ламелей, температуру и скорость воды в трубках, скорость воздуха, а будем менять количество рядов, получим результаты, подобные приведенным на рис. 6. Видим, что ТО с малым количеством рядов не осушает. Когда мы увеличиваем количество рядов, теплообменник становится частично мокрым, а в некоторых случаях может быть и полностью мокрым.

Заключение

На основе понимания процесса охлаждения воздуха проектировщик может предложить лучший вариант целой системы, исключая возможность ошибки при оценке параметров воздуха на выходе из приточной установки или кондиционера.

Еще до выбора конкретного ТО проектировщик может увидеть как будут влиять на параметры воздуха размеры установки и/или обратить большее внимание на ту или иную сторону системы (выбор и температура хладагента, высокая или низкая скорость жидкости, потери напора, особые требования к ламелям и т.д.). На рынке, к сожалению, мало свободных к доступу программ, которые бы правильно рассчитывали ТО в соответствие с нормами, как было продемонстрировано в этой статье. Для тех, кого ин-

тересует этот вопрос можем, посоветовать, например, использовать программу расчета HX, отвечающую этим требованиям. Программу можно свободно скопировать на сайте www.janka.cz [4].

Литература

[1] Standard 410, Forced-Circulation Air-Cooling and Air-Heating Coils, Air-Conditioning & Refrigeration Institute, Arlington, Virginia, 2001

[2] Brož, J: Bilan de l'amélioration du côté air et du côté tube d'une batterie à ailettes, Revue

Pratique du Froid, №994 (march 2011), Paris

[3] Harok, V: Lamelové výměníky: Nepohodlná pravda II. Strana vzduchu, časopis Klimatizace, č. 3/2010, Praha

[4] Harok, V: Novinka zdarma: Program HX pro ohřev a chlazení vzduchu, Kholodilny Business, №8/2010, Moscow

[5] Harok, V: Lamelové výměníky: Nepohodlná pravda I. Strana vody, Kholodilny Business, №7/2010, Moscow



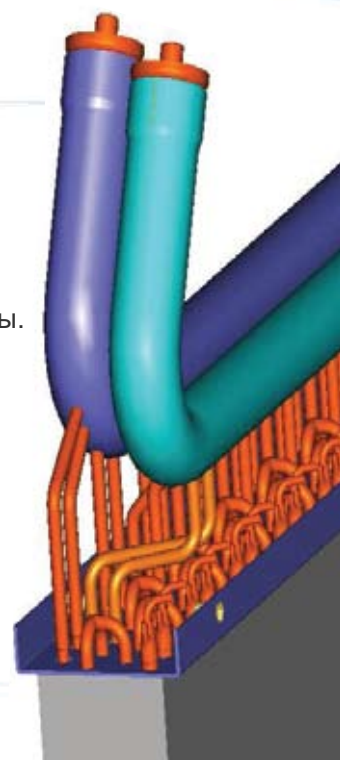
LIVE THE FUTURE

Самое важное всегда сокрыто внутри. За свою жизнь теплообменник постоянно подвергается различным циклическим воздействиям давлений и температур. Конструкция теплообменника должна обеспечивать прочность и работоспособность этого компонента в течение всего срока службы всей системы. Благодаря конструкции теплообменников LLOYD COILS EUROPE, созданной на основе многолетнего опыта проектирования и постоянно совершенствующегося процесса производства, наши теплообменники отличаются от всех имеющихся на рынке наилучшим качеством.

Теплообменные батареи: конденсаторы, испарители, охладители жидкости.

Программное обеспечение. Качество. Гарантия.

Опыт. Надежность. lloydcoils.eu



LLOYD COILS EUROPE s.r.o.

Vražska 143, 15300 Praha 5 – Radotin Czech Republic

Tel.: +420 234 789 211 Fax: +420 234 789 223