

# 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 (АНУ), 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

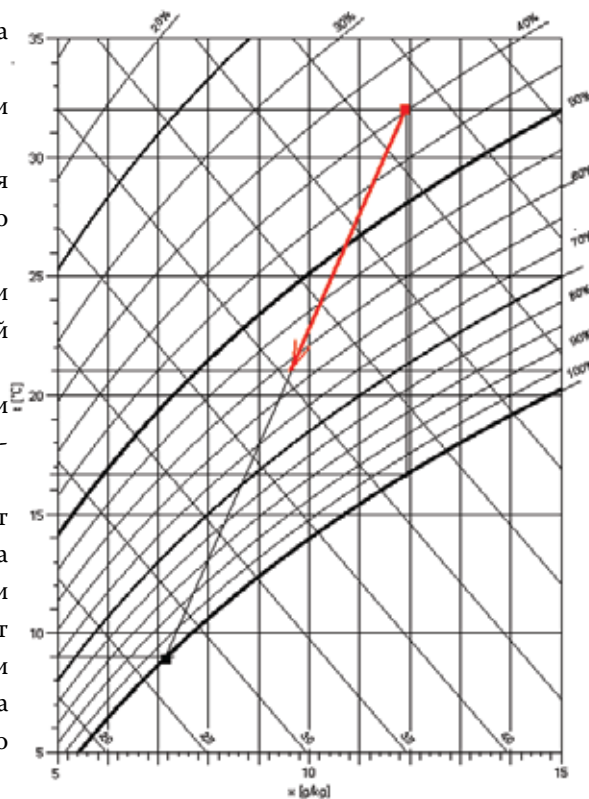
подобное изображенному на **рис. 3а**:

- 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.

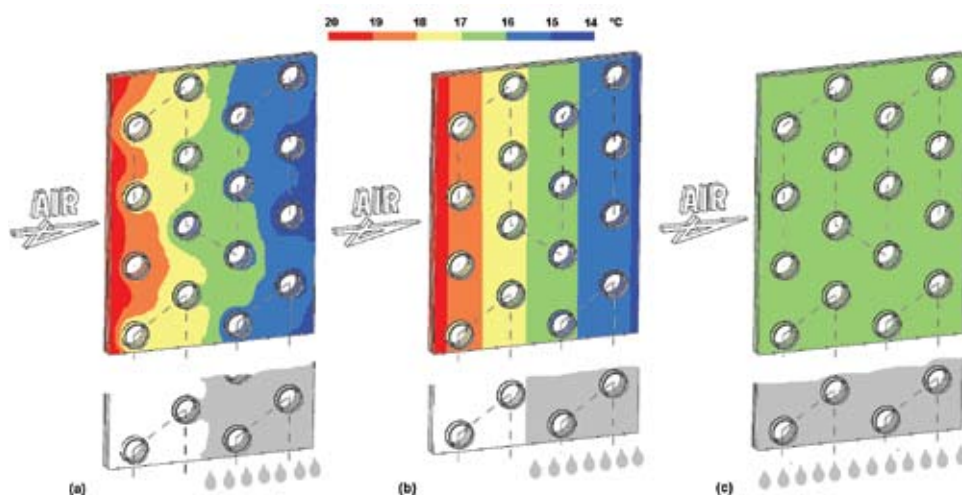
Доходит до неправильностей, которые могут быть вызваны многими факторами, включая движения капель конденсата.

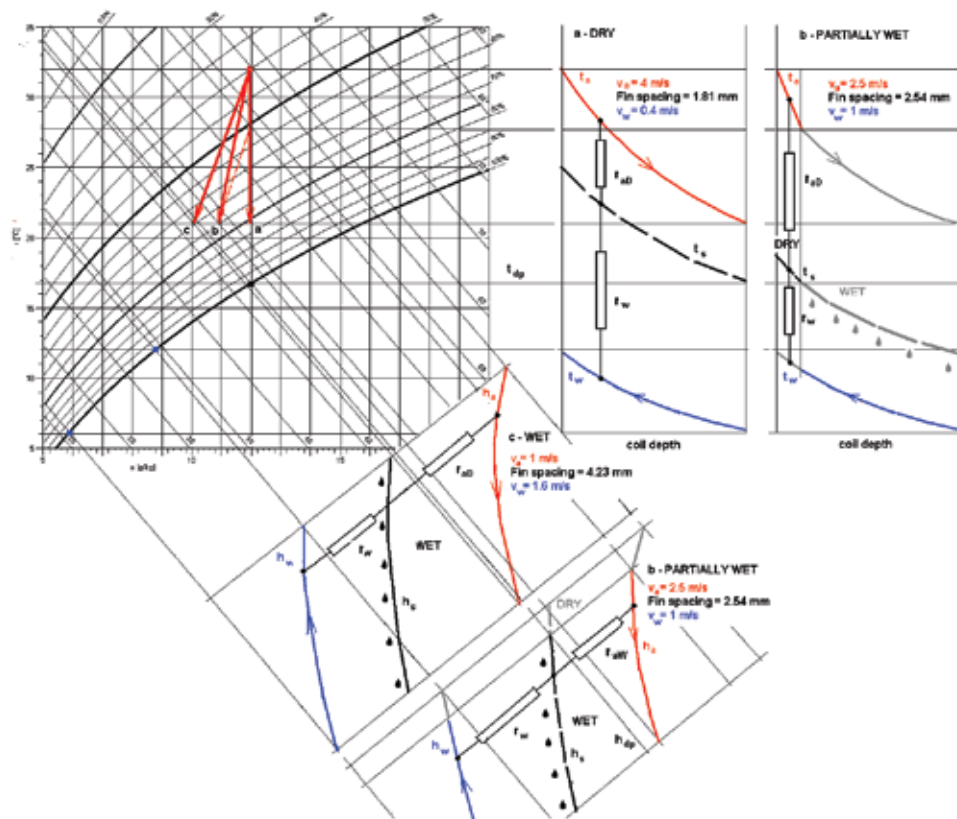
Если мы пренебрежем факторами 4 - 6, получим модель течения воздуха,



**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 АRI 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-x 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  $\alpha_{aD}$ , и  $\alpha_{aw}$  коэффициенты теплоотдачи на стороне воздуха, измеренные соответственно при сухой и мокрой поверхности,  $\alpha_w$  – 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  $\alpha_{aD}$ , и соотв.  $\alpha_{aw}$  зависят от профиля ламели и скорости воздуха. Коэффициент теплоотдачи на

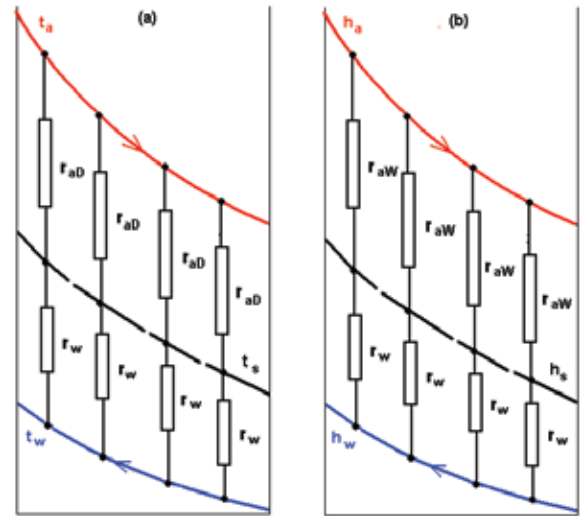


Рис. 5. Схема расчета изменения температуры поверхности охладителя для сухой (а) и мокрой (б) поверхности.

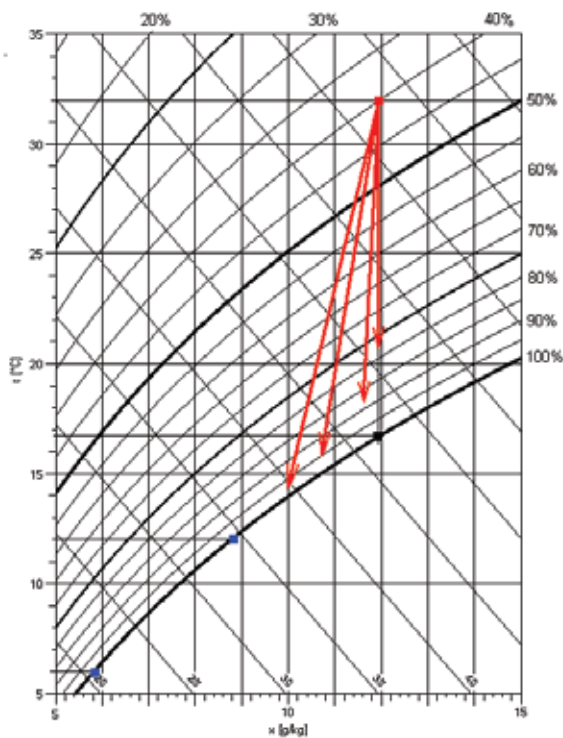
стороне хладагента зависит, помимо прочего, от скорости потока жидкости в трубках. (Для полноты добавим, что единицей температурного сопротивления является К/Вт в отличие от теплового сопротивления, которое обычно обозначают большой буквой R и измеряют в  $m^2.K/W$ )

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 НХ, отвечающую этим требованиям. Программу можно свободно скопировать на сайте [www.janka.cz](http://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