

УДК 621.565.9.045

Методика расчета теплообмена при движении воздуха в поверхностных воздухоохладителях

Канд. техн. наук А. Л. ЕМЕЛЬЯНОВ

emelianov@mail.ru

Университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Е. В. КОЖЕВНИКОВА

cheine@yandex.ru

ОАО «ИЭМЗ «Купол», 426033, г. Ижевск, ул. Песочная, 3

Предложена методика расчета воздухоохладителей, учитывающая все возможные случаи охлаждения (сухое охлаждение, возможность выпадения конденсата на всей или частично поверхности теплообменника), предусматривающая разные этапы расчета и переход от одного этапа к другому в зависимости от реализуемого режима охлаждения. Методика основана на результатах экспериментальных исследований трубчато-пластинчатых воздухоохладителей. Приведены результаты сравнения данных расчета и эксперимента.

Ключевые слова: воздухоохладитель, методика, расчет, режим, конденсация, эксперимент, погрешность.

Heat exchange calculation for the process of air movement in surface air coolers

Ph. D. A. L. EMELIANOV

emelianov@mail.ru

University ITMO

Institute of Refrigeration and Biotechnologies

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

E. V. KOZHEVNIKOVA

cheine@yandex.ru

Open joint-stock company «IEMZ «Kupol», Izhevsk

The proposed calculation procedure for air coolers takes into account all possible types of cooling (dry cooling, or possible condensate fallout on the entire surface of a heat exchanger or part of it), envisages different phases of calculation, and provides transition from one phase to another depending on the given cooling mode. The procedure is based on the results of experimental research on tube and fin air coolers. Calculation results are compared with the experimental data.

Keywords: air cooler, procedure, calculation, mode, condensation, experiment, calculation error.

Достоверность расчетов воздухоохладителей и испарителей для аппаратов холодильной техники и систем кондиционирования по известным методикам снижается, если конденсат образуется только на части поверхности теплообмена и если теплообменник имеет развитую наружную поверхность [1]. Утверждение, что процесс охлаждения с выделением влаги идет по некой прямой, соединяющей точки t_{n1} и t_{n2} , и направлен на среднюю температуру поверхности воздухоохладителя, представ-

ляется приближенным и недостаточно обоснованным [2]. Результаты экспериментов, описанных в работе [1], говорят о том, что процесс идет по определенной кривой и температура поверхности воздухоохладителя меняется. Выяснено, что в любом месте по ходу движения воздуха в воздухоохладителе процесс охлаждения направлен не на среднюю температуру поверхности воздухоохладителя в данном месте, а на максимальную, которая достигается на конце ребра и равна температуре точки росы для воздуха в данном месте. С результатами испытаний воздухоохладителей работы [1] удовлетворительно согласуется предположение, что уклон процесса охлаждения можно все-таки считать прямолинейным, если определять его по средней температуре воды и воздуха в воздухоохладителе и направлять на температуру на конце ребра, равную температуре точки росы для воздуха со средней температурой и средним влагосодержанием.

В воздухоохладителях возможна реализация одного из трех режимов охлаждения: сухое охлаждение, смешанное охлаждение (когда только часть поверхности ребер покрыта влагой) и охлаждение с выделением влаги. При обработке результатов испытаний воздухоохладителей было выяснено, что воздухоохладители нельзя считать по одному из этих режимов охлаждения, так как по ходу воздуха в некоторых теплообменниках происходит смена режимов охлаждения [1]. Таким образом, в одном воздухоохладителе реализуется один, два, а иногда и все три режима охлаждения. Поэтому при расчете воздухоохладителей основной задачей является определение реализующихся режимов охлаждения и внутренних площадей теплообмена, на которых происходит охлаждение по данным режимам. Ниже предлагается, в дополнение к существующим и общепринятым методикам, рассмотренным в работе [2], решать эту задачу следующим способом.

На первом этапе необходимо проверить начнется ли охлаждение в сухом режиме. Проводится рас-

чет температуры наружной поверхности стенки трубок на входе в воздухоохладитель $t_{\text{ст. н1}}$ по алгоритму расчета сухого охлаждения (это режим охлаждения с выделением влаги, когда коэффициент влаговыведения равен единице [2]). Затем выполняется проверка правомерности расчета воздухоохладителя по алгоритму сухого охлаждения на первой по ходу воздуха части поверхности теплообмена. Температура $t_{\text{ст. н1}}$ должна быть не ниже температуры точки росы t_p для воздуха на входе в воздухоохладитель

$$t_{\text{ст. н1}} \geq t_p. \quad (1)$$

Если условие (1) выполняется, то это значит, что охлаждение воздуха начинается в сухом режиме и необходимо перейти к следующему этапу расчета. Если условие (1) не выполняется, можно утверждать только, что охлаждение не начинается с сухого и необходимо перейти к четвертому этапу расчета.

На втором этапе необходимо проверить, реализуется ли на всей поверхности воздухоохладителя только один режим сухого охлаждения. Для этого воздухоохладитель рассчитывается по тому же алгоритму расчета сухого охлаждения. Далее выполняется проверка правильности расчета по алгоритму сухого охлаждения на всей поверхности теплообмена. Температура наружной поверхности стенки трубок на выходе из воздухоохладителя $t_{\text{ст. н2}}$ должна быть не ниже температуры точки росы t_p для воздуха на входе в воздухоохладитель

$$t_{\text{ст. н2}} \geq t_p. \quad (2)$$

Если условие (2) выполняется, то это значит, что на всей поверхности воздухоохладителя реализуется только один режим сухого охлаждения, расчет воздухоохладителя необходимо на этом закончить и не переходить к следующим этапам. Если условие (2) не выполняется, можно утверждать только, что охлаждение воздуха начинается с сухого, а потом переходит в смешанное охлаждение и необходимо перейти к следующему этапу расчета.

На третьем этапе необходимо найти первую по ходу воздуха часть площади теплообмена воздухоохладителя, на которой реализуется сухое охлаждение. Для этого подбирается такая температура воздуха на выходе из зоны сухого охлаждения, чтобы на выходе из этой зоны выполнялось следующее условие: температура наружной поверхности стенки трубок на выходе из зоны сухого охлаждения должна быть равна температуре точки росы для воздуха на входе в воздухоохладитель с точностью a

$$100 \cdot \frac{t_{\text{ст. н2}} - t_p}{t_p} \leq a. \quad (3)$$

Выбрана определенная точность a (например 0,01%), так как в программах расчета нельзя добиться полного равенства.

Если условие (3) выполняется, значит найдена точка перехода от сухого охлаждения к смешанному. Иначе говоря, найдена температура воздуха на выходе из зоны сухого охлаждения и первая по ходу воздуха часть поверхности теплообмена, на которой реали-

зуется режим сухого охлаждения. После этого можно перейти к пятому этапу расчета. Если условие (3) не выполняется, то необходимо изменять принятую температуру воздуха на выходе из зоны сухого охлаждения и повторять расчет 3-го этапа, пока не будет выполнено условие (3).

На четвертом этапе необходимо в следующей последовательности проверить, реализуется ли в воздухоохладителе режим смешанного охлаждения.

Особенностью этого расчета является то, что поверхность воздухоохладителя делится на две части (подзоны). На одной происходит выделение влаги и расчет ее похож на расчет охлаждения с выделением влаги, а на второй части реализуется сухое охлаждение и расчет идет по алгоритму сухого охлаждения. Первая часть поверхности представляет собой наружную поверхность трубок и часть поверхности ребер, а вторая — оставшуюся часть поверхности ребер. Таким образом, деление поверхности на сухую и смоченную происходит на некоторой условной высоте ребра h_p , где температура поверхности ребра достигает температуры точки росы воздуха с влагосодержанием, равным среднему влагосодержанию в подзоне охлаждения с выделением влаги для зоны смешанного охлаждения. Для перехода к реальной высоте ребра, соответствующей условной высоте h_p , необходимо h_p умножить на коэффициент Б, определяемый следующим образом:

$$Б = \frac{\sqrt{S_{\text{фр}} S_{\text{прод}} / \pi - d_n}}{2h}, \quad (4)$$

где $S_{\text{фр}}$ — межцентровое расстояние трубок во фронтальном сечении теплообменника;

$S_{\text{прод}}$ — расстояние между вертикальными рядами или продольный шаг трубок; d_n — наружный диаметр трубок; h — условная высота ребра.

Деление площади можно осуществить следующим образом. Площадь ребер на 1 м длины трубки в подзоне сухого охлаждения для зоны смешанного охлаждения можно рассчитать по формуле

$$F_{\text{р. см. с}} = \frac{2}{u} \left(S_{\text{фр}} S_{\text{прод}} - \frac{d(d_n + 2Бh_p)^2}{4} \right), \quad (5)$$

где u — шаг ребер.

Площадь ребер на 1 м длины трубки в подзоне охлаждения с выделением влаги для зоны смешанного охлаждения определяется по формуле

$$F_{\text{р. см. м}} = \frac{2}{u} \cdot \frac{\pi \left((d_n + 2Бh_p)^2 - d_n^2 \right)}{4}. \quad (6)$$

Для расчета также необходимо поделить массовый расход абсолютно сухого воздуха, проходящего через всю зону смешанного охлаждения. Деление происходит по отношению наружной площади соответствующей части к имеющейся наружной площади теплообмена в зоне смешанного охлаждения. Условная высота ребра h_p определяется из граничного условия равенства температурных градиентов двух подзон на высоте h_p с точностью a , т. е. из решения следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} 100 \cdot \frac{\text{grad } t_{\text{см.с}}|_{h=h_p} - \text{grad } t_{\text{см.м}}|_{h=h_p}}{\text{grad } t_{\text{см.с}}|_{h=h_p}} &\leq a; \\ \text{grad } t_{\text{см.с}}|_{h=h_p} &= -m_{1\text{см.с}}(t_{\text{в ср п см м}} - t_{\text{в ср см м}}) \times \\ &\quad \times \text{th}(m_{1\text{см.с}}(h - h_p)); \\ \text{grad } t_{\text{см.м}}|_{h=h_p} &= m_{1\text{см.м}} \frac{(t_{\text{в ср п см м}} - t_{\text{в ср см м}}) \text{ch}(m_{1\text{см.м}} h_p)}{\text{sh}(m_{1\text{см.м}} h_p)} - \\ &\quad - \frac{0,98(t_{\text{ст.см}} - t_{\text{в ср см м}})}{\text{sh}(m_{1\text{см.м}} h_p)}, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где $\text{grad } t_{\text{см.с}}|_{h=h_p}$ — температурный градиент в подзоне сухого охлаждения для зоны смешанного охлаждения на высоте ребра h_p ;

$\text{grad } t_{\text{см.м}}|_{h=h_p}$ — температурный градиент в подзоне охлаждения с выделением влаги для зоны смешанного охлаждения на высоте ребра h_p ;

$m_{1\text{см.с}}$ — величина m_1 [2] в подзоне сухого охлаждения для зоны смешанного охлаждения;

$t_{\text{в ср п см м}}$ — температура точки росы воздуха с влажностью, равным среднему влагосодержанию в подзоне охлаждения с выделением влаги для зоны смешанного охлаждения;

$t_{\text{в ср см с}}$ — средняя температура воздуха в подзоне сухого охлаждения для зоны смешанного охлаждения;

$m_{1\text{см.м}}$ — величина m_1 [2] в подзоне охлаждения с выделением влаги для зоны смешанного охлаждения;

$t_{\text{в ср см м}}$ — средняя температура воздуха в подзоне охлаждения с выделением влаги для зоны смешанного охлаждения;

$t_{\text{ст.см}}$ — температура стенки трубок воздухоохладителя в зоне смешанного охлаждения.

Влагосодержание воздуха на выходе из подзоны охлаждения с выделением влаги в зоне смешанного охлаждения определяется из условия, что на высоте h_p температура поверхности ребра равна, с точностью a , температуре точки росы воздуха со средним влагосодержанием в зоне смешанного охлаждения, т. е.

$$\left\{ \begin{aligned} 100 \cdot \frac{t_{\text{в ср п см пров}} - t_{\text{в ср п см}}}{t_{\text{в ср п см}}} &\leq a; \\ t_{\text{в ср п см пров}} &= t_{\text{в ср см}} + (t_{\text{п см}} - t_{\text{в ср см}}) \times \\ &\quad \times m_{1\text{см}} h \frac{\text{ch}(m_{1\text{см}}(h - h_p))}{\text{sh}(m_{1\text{см}} h)}, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

где $t_{\text{в ср п см пров}}$ — проверочное значение температуры точки росы воздуха с влажностью, равным среднему влагосодержанию в зоне смешанного охлаждения;

$t_{\text{в ср п см}}$ — температура точки росы воздуха с влажностью, равным среднему влагосодержанию в зоне смешанного охлаждения;

$t_{\text{в ср см}}$ — средняя температура воздуха в зоне смешанного охлаждения;

$t_{\text{п см}}$ — температура поверхности воздухоохладителя в зоне смешанного охлаждения;

$m_{1\text{см}}$ — величина m_1 [2] в зоне смешанного охлаждения.

Температура воздуха на выходе из подзоны охлаждения с выделением влаги для зоны смешанного охлаждения определяется из условия, что требуемая длина трубок воздухоохладителя в подзоне сухого охлаждения для зоны смешанного охлаждения должна быть равна требуемой длине трубок воздухоохладителя в зоне смешанного охлаждения с точностью a (погрешность a рассчитывается по отношению к требуемой длине трубок воздухоохладителя в подзоне сухого охлаждения для зоны смешанного охлаждения).

Затем выполняется проверка наличия режима смешанного охлаждения в воздухоохладителе. Температура на конце ребра на выходе из зоны смешанного охлаждения $t_{\text{к п2 см}}$ должна быть не ниже температуры точки росы воздуха с влагосодержанием на выходе из зоны смешанного охлаждения $t_{\text{в2 п см}}$, т. е.

$$t_{\text{к п2 см}} \geq t_{\text{в2 п см}} \quad (9)$$

Если выполняется условие (9), то это значит, что в воздухоохладителе существует режим смешанного охлаждения, и необходимо перейти к следующему, пятому, этапу расчета. Если условие (9) не выполняется, можно утверждать, что в воздухоохладителе реализуется только режим охлаждения с выделением влаги на всей поверхности и необходимо перейти к седьмому этапу расчета.

На пятом этапе нужно проверить, заканчивается ли охлаждение воздуха смешанным режимом или в воздухоохладителе происходит переход на охлаждение с выделением влаги на всей поверхности. Для этого воздухоохладитель рассчитывается по алгоритму расчета смешанного охлаждения, описанному в 4-ом этапе расчета, в предположении, что охлаждение заканчивается смешанным режимом и перехода на охлаждение с выделением влаги не происходит. Далее выполняется проверка правильности расчета по вышеуказанному алгоритму смешанного охлаждения. Температура на конце ребра на выходе из зоны смешанного охлаждения $t_{\text{к п2 см}}$ должна быть не ниже температуры точки росы воздуха с влагосодержанием на выходе из воздухоохладителя $t_{\text{в2 п}}$, т. е.

$$t_{\text{к п2 см}} \geq t_{\text{в2 п}} \quad (10)$$

Если условие (10) выполняется, следовательно, охлаждение в воздухоохладителе заканчивается в смешанном режиме и расчет необходимо закончить, не переходя к следующим этапам. Если условие (10) не выполняется, то можно утверждать, что в воздухоохладителе происходит переход от смешанного охлаждения к охлаждению с выделением влаги на всей поверхности и необходимо перейти к следующему этапу расчета.

На шестом этапе следует найти часть площади теплообмена воздухоохладителя, на которой реализуется смешанное охлаждение. Для этого подбирается такая температура воздуха на выходе из подзоны сухого охлаждения для зоны смешанного охлаждения, чтобы на выходе из зоны смешанного охлаждения выполнялось следующее условие. Температура на конце ребра на выходе из зоны смешанного охлаждения $t_{\text{к п2 см}}$ должна быть равна с точностью a температуре точки росы воздуха на выходе из зоны смешанного охлаждения $t_{\text{в2 п см}}$, т. е.

$$100 \cdot \frac{t_{\text{к п2 см}} - t_{\text{в2 п см}}}{t_{\text{в2 п см}}} \leq a \quad (11)$$

Если выполняется условие (11), следовательно, найдена точка перехода от смешанного охлаждения к охлаждению с выделением влаги (т.е. найдена температура воздуха на выходе из подзоны сухого охлаждения для зоны смешанного охлаждения и часть поверхности теплообмена, на которой реализуется режим смешанного охлаждения). Кроме того, необходимо будет перейти к следующему этапу расчета. Если условие (11) не выполняется, то необходимо изменить принятую температуру воздуха на выходе из подзоны сухого охлаждения для зоны смешанного охлаждения и повторить расчет 6-ого этапа до выполнения указанного условия.

Седьмой этап позволяет рассчитать режим мокрого охлаждения из условия, что температура на конце ребра равна температуре точки росы для воздуха в данном месте и коэффициент контакта $C_k = 0,98$ [2].

Проверка описанной методики выполнена, в сравнении с результатами эксперимента статьи [1], для воздухоохладителей из трубок 9,52 мм и 12 мм. Отклонение расчетных значений $F_{\text{вн. треб}}$ внутренней площади теплообмена воздухоохладителя от реальных площадей $F_{\text{вн.}}$, использованных в эксперименте теплообменников

$$\delta F_{\text{вн.}} = 100 \cdot \frac{F_{\text{вн.}} - F_{\text{вн. треб}}}{F_{\text{вн.}}} \text{ составило от 1\% до 25\%}.$$

В разработанном алгоритме не учтено влияние на теплопередачу выноса влаги с поверхности воздухоохладителя вместе с воздухом при высокой массовой скорости воздуха (выше $5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$). Согласно литературным данным [3–6] при массовой скорости воздуха в живом сечении выше $5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ начинается вынос влаги и аэродинамическое сопротивление при дальнейшем росте массовой скорости увеличивается медленнее. В наших теплообменниках наблюдался вынос влаги при массовой скорости $5,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Это приводит к тому, что, имея более низкую температуру поверхности, капли конденсата являются дополнительным источником холода, и воздух охлаждается до более низкой температуры, чем это дают расчеты по разработанному алгоритму.

Предлагаемая методика расчета воздухоохладителей позволяет с большей точностью рассчитать требуемую площадь теплообмена пластинчато-ребристых теплообменников, и, как следствие, их габариты, массу и холодопроизводительность. Она также может быть использована при разработке сервисных программ.

Список литературы

1. Кожевникова Е. В., Лопаткина Т. А. Экспериментальное исследование эффективности методов расчета трубчато-пластинчатых воздухоохладителей при различных режимах образования конденсата. // Холодильная техника и кондиционирование. 2011. № 1.
2. Данилова Г. Н., Богданов С. Н., Иванов О. П. и др. Теплообменные аппараты холодильных установок. — Л.: Машиностроение, 1986. 303 с.
3. Кокорин О. Я. Установки кондиционирования воздуха. Основы расчета и проектирования. — М.: Машиностроение, 1978. 264 с.
4. Кожевникова Е. В., Емельянов А. Л., Лопаткина Т. А. Учет контактного сопротивления трубка-воротник ребра при расчете трубчато-пластинчатых теплообменников для систем холодоснабжения и кондиционирования // Вестник Международной академии холода. 2013. № 3. С. 50–54.
5. Емельянов А. Л., Лопаткина Т. А. Анализ вариантов компоновки трубчато-пластинчатого теплообменника по высоте // Холодильная техника и кондиционирование. 2011. № 1. С. 3.
6. Емельянов А. Л., Кожевникова Е. В. Аэродинамическое сопротивление воздушных трубчато-пластинчатых теплообменников // Вестник Международной академии холода. 2011. № 4. С. 43–45.

References

1. Kozhevnikova E. V., Lopatkina T. A. *Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie*. 2011. № 1.
2. Danilova G. N., Bogdanov S. N., Ivanov O. P. i dr. *Teploobmennye apparaty holodil'nyh ustanovok*. — L.: Mashinostroenie, 1986. 303 s.
3. Kokorin O. Ja. *Ustanovki kondicionirovanija vozduha. Osnovy rascheta i proektirovanija*. — M.: Mashinostroenie, 1978. 264 s.
4. Kozhevnikova E. V., Emel'janov A. L., Lopatkina T. A. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2013. No 3. pp. 50–54.
5. Emel'janov A. L., Lopatkina T. A. *Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie*. 2011. No 1. p. 3.
6. Emel'janov A. L., Kozhevnikova E. V. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2011. No 4. pp. 43–45.