

УДК 53.087.3

Оценка эффективности пластинчатых рекуператоров с учетом влаговыпадения

Канд. техн. наук А. О. КРЕКТУНОВ

aokrek@mail.ru

ЗАО «КЛИМАТ — ПРОФ»

196128, Санкт-Петербург, Варшавская ул., 2/1, лит. «Д»

Д-р техн. наук А. Б. СУЛИН

Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины федерального медико-биологического агентства

196143, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, 65

А. А. ТИХОНОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Объект исследования теплообменники — утилизаторы, пластинчатого типа, применяемые в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. Рассмотрены особенности оценки тепловой эффективности теплообменных аппаратов с конденсацией пара на холодной поверхности. Определено влияние процесса конденсации пара на эффективность теплообменника при одинаковых значениях коэффициентов теплопередачи «сухого процесса» и с учетом массообмена.

Ключевые слова: теплообменник, утилизации теплоты, эффективность, теплообмен, конденсация пара.

Evaluation of the effectiveness of lamellar recuperators with regard to falling out water

Ph. D. A. S. KREKTUNOV

aokrek@mail.ru

CJSC «CLIMATE — PROF»

D. Sc. A. B. SULIN

Institute of industrial and marine medicine of the Federal medical-biological Agency of the Russian Federation

A. A. TIKHONOV

University ITMO

Institute of Refrigeration and Biotechnologies

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

Object of research of heat exchangers, heat recovery steam generators, plate type, used in the systems of ventilation and air-conditioning. The features of assessing the thermal efficiency of heat exchangers with the condensation of steam on the cold surface. The effect of the process of steam condensation on the efficiency of the heat at equal values of heat transfer coefficients «dry process» and taking into account the mass transfer.

Keywords: heat exchanger, heat utilization, efficiency, heat, vapor condensation.

Регенеративные теплообменники пластинчатого типа, применяемые для утилизации теплоты в системах вентиляции и кондиционирования воздуха, обладают рядом преимуществ:

- относительно низкой стоимостью;
- простотой в эксплуатации;

- отсутствием движущихся частей;
- отсутствием взаимного загрязнения потоков;
- сравнительно небольшим аэродинамическим сопротивлением при ламинарном движении потоков в каналах. При этом, для данной области применения, характерны не только «сухие», но и «влажные» процессы теплообмена в каналах при конденсации пара из потока теплового влажного воздуха.

Рассмотрим особенности оценки тепловой эффективности теплообменных аппаратов с конденсацией пара на холодной поверхности. Если в обоих проходящих через теплообменник теплоносителях не происходит фазовых переходов, то в стационарных условиях уравнение теплового баланса имеет вид

$$\dot{M}_x (h_x^{\text{ВВХ}} - h_x^{\text{ВХ}}) = \dot{M}_r (h_r^{\text{ВХ}} - h_r^{\text{ВВХ}}).$$

Это уравнение можно записать в виде

$$\dot{M}_x c_{pX} (t_x^{\text{ВВХ}} - t_x^{\text{ВХ}}) = \dot{M}_r c_{pR} (t_r^{\text{ВХ}} - t_r^{\text{ВВХ}});$$

$$\dot{C}_x \Delta t_x = \dot{C}_r \Delta t_r,$$

где c_{pX} и c_{pR} — средние удельные теплоемкости при постоянном давлении двух теплоносителей в указанных диапазонах температур;

$\dot{C}_x = \dot{M}_x c_{pX}$ и $\dot{C}_r = \dot{M}_r c_{pR}$ — водяные эквиваленты; Δt_x и Δt_r — изменение температур холодного и горячего теплоносителей в теплообменнике.

Для условий, когда в одном теплоносителе происходит фазовый переход, а в другом его нет, то в общем случае справедливы соотношения:

$$\dot{Q}_x = \dot{C}_x (t_x^{\text{ВВХ}} - t_x^{\text{ВХ}});$$

$$\dot{Q}_r = \dot{C}_r (h_r^{\text{ВХ}} - h_r^{\text{ВВХ}});$$

или

$$\dot{Q}_x = \dot{M}_x (h_x^{\text{ВЫХ}} - h_x^{\text{ВХ}});$$

$$\dot{Q}_r = \dot{M}_r (h_r^{\text{ВХ}} - h_r^{\text{ВЫХ}}).$$

Если ввести понятие условного водяного эквивалента для среды, в которой реализуется фазовый переход

$$\begin{aligned} \dot{Q}_r &= \dot{C}_{r,\text{фик}} (t_r^{\text{ВХ}} - t_r^{\text{ВЫХ}}) \approx \\ &\approx \dot{M}_r c_{p\Gamma} (t_r^{\text{ВХ}} - t_r^{\text{ВЫХ}}) + \dot{M}_r \Delta d \cdot r \end{aligned}$$

то выражение для условного водяного эквивалента примет вид

$$\begin{aligned} \dot{C}_{r,\text{фик}} &= \dot{M}_r \frac{(h_r^{\text{ВХ}} - h_r^{\text{ВЫХ}})}{(t_r^{\text{ВХ}} - t_r^{\text{ВЫХ}})} \approx \\ &\approx \frac{\dot{M}_r c_{p\Gamma} (t_r^{\text{ВХ}} - t_r^{\text{ВЫХ}}) + \dot{M}_r \Delta d \cdot r}{(t_r^{\text{ВХ}} - t_r^{\text{ВЫХ}})} \approx \\ &\approx \dot{M}_r c_{p\Gamma} \left(1 + \frac{\Delta d \cdot r}{c_{p\Gamma} (t_r^{\text{ВХ}} - t_r^{\text{ВЫХ}})} \right). \end{aligned}$$

Из условия теплового баланса $Q_x = Q_r$ следует

$$\frac{\dot{M}_x}{\dot{M}_r} = \frac{h_r^{\text{ВХ}} - h_r^{\text{ВЫХ}}}{h_x^{\text{ВЫХ}} - h_x^{\text{ВХ}}} = \frac{\dot{C}_x}{\dot{C}_{r,\text{фик}}} \neq \frac{\dot{C}_x}{\dot{C}_r}.$$

Для оценки коэффициента теплопередачи, входящего в параметр NTU (число единиц переноса), является удобным использование условного показателя — удельной теплоемкости насыщенного воздуха c_s на линии насыщения $\varphi = 1$ [1]:

$$\begin{aligned} c_s &= \left. \frac{dh}{dt} \right|_{\varphi=1} = c_{p\text{с.в.}\Gamma} + c_{p\Pi} d + r \left. \frac{d(d)}{dt} \right|_{\varphi=1} = \\ &= c_{p\text{в.в}} + r \left. \frac{d(d)}{dt} \right|_{\varphi=1} \end{aligned}$$

Зависимость влагосодержания d от температуры t для относительной влажности $\varphi = 1$ аппроксимирована полиномом четвертой степени

$$d_{\varphi=1} = (3,64 \cdot 10^{-6} t^4 + 1,703 \cdot 10^{-4} t^3 + 8,287 \cdot 10^{-3} t^2 + 0,284 \cdot t + 3,76) \cdot 10^{-3}, \text{ кг/кг.}$$

Тогда

$$\frac{\partial(d_{\varphi=1})}{\partial t} = (1,456 \cdot 10^{-5} t^3 + 5,109 \cdot 10^{-4} t^2 + 1,657 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0,284) \cdot 10^{-3}, \text{ (кг/кг)/К.}$$

Если принять теплоту парообразования $r = 2500$ кДж/кг, то

$$r \frac{\partial d_{\varphi=1}}{\partial t} = (3,64 \cdot 10^{-2} t^3 + 1,277 t^2 + 41,435 t + 710) \cdot 10^{-3}, \text{ (кДж/кг) \cdot (кг/кг)/К.}$$

Учитывая соотношение Меркеля [1]

$$\dot{Q} = \frac{\alpha}{c_b} (h_{\text{п}} - h_{r,\delta}),$$

запишем, следуя рекомендациям [1], уравнение теплопередачи в виде:

$$\dot{Q} = K_l F (h_r - h_x) / c_s,$$

где

$$K_h = [1/\alpha_r + \delta_w/\lambda_w + 1/\alpha_{\text{кон}} + c_b/(\alpha_r c_s)]^{-1}.$$

Исходя из того, что $\dot{C}_{r,\text{фик}}$ при конденсации пара на холодной поверхности всегда больше \dot{C}_x , при обработке опытных данных и при использовании зависимостей, для соответствующей схемы потоков в теплообменнике, выполняются условия $\varepsilon = f(\text{NTU}, \dot{C}_x/\dot{C}_{\text{max}})$, $C_{\text{max}} = C_{r,\text{фик}}$. В данном случае, при обеспечении, равенства водяных эквивалентов для «сухого процесса», в расчетные зависимости для эффективности подставляется величина $\dot{C}_x/\dot{C}_{r,\text{фик}}$, значение которой изменяется в диапазоне от 1 до 0.

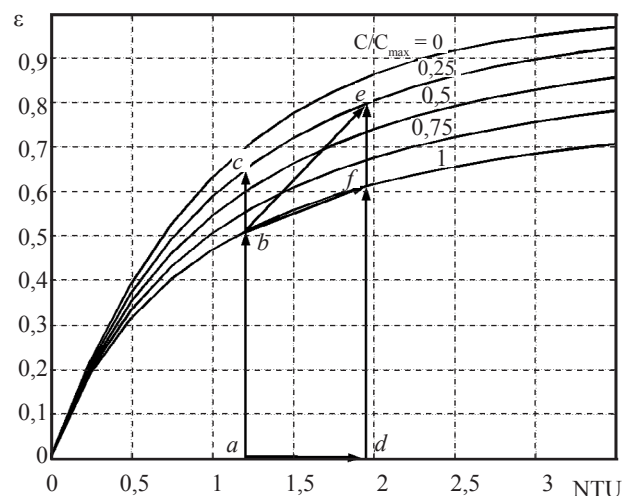
На рисунке, в качестве примера, приведен график зависимости $\varepsilon = f(\text{NTU}, \dot{C}_x/\dot{C}_{r,\text{фик}})$.

Здесь $\dot{C} = \dot{C}_x$, $\dot{C}_{\text{max}} = \dot{C}_{r,\text{фик}}$, число единиц переноса определяется как $\text{NTU} = \frac{kF}{\dot{C}_{\text{min}}}$.

Коэффициент теплопередачи может быть рассчитан при известном значении NTU. В литературе, и в частности в работе [2], приводятся графические зависимости для расчета $\varepsilon = f(\text{NTU}, \dot{C}_x/\dot{C}_{\text{max}})$, однако точность определения NTU оказывается достаточно низкой. Для однократного перекрестного тока, когда оба теплоносителя абсолютно не перемешиваются воспользуемся зависимостью, приведенной в работе [3]

$$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ \left[\exp \left(-\text{NTU}^{0,78} \frac{\dot{C}_r}{\dot{C}_x} \right) - 1 \right] \cdot \frac{\dot{C}_r}{\dot{C}_x} \text{NTU}^{0,22} \right\}.$$

Алгоритм влияния процесса конденсации пара на эффективность теплообменника при одинаковых значениях коэффициентов теплопередачи «сухого процесса» (линия $a-b$) и с учетом массообмена (линия $a-c$) показан на рис. При увеличении коэффициента теплопередачи вследствие фазового перехода или вследствие интенсификации теплообмена происходит увеличение значения NTU, например, от значения NTU_a в точке a до значения NTU_d в точке d . Эффективность теплообменника с интенсификацией при «сухом» теплообмене определяется в точке f (при принятом условии равенства водяных эквивалентов потоков). Совместное



Влияние конденсации пара из потока влажного воздуха на эффективность теплоутилизатора

влияние на эффективность, как интенсификации теплообмена, так и процесса конденсации пара из потока влажного воздуха, определяется, параметрами в точке e . Линия $\dot{C}/\dot{C}_{\max} = 0$ на графике характеризует граничное значение эффективности, к которому она в пределе стремится за счет конденсации пара из потока влажного воздуха.

Список литературы

1. Ховалыг Д., Бараненко А. В. Методы расчета градиента давления двухфазного потока при течении в малых каналах // Вестник Международной академии холода. 2012. №1. С. 3–10.
2. Богословский В. Н., Поз М. Я. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Стройиздат, 1988, 320 с.
3. Кейс В. М., Лондон А. Л. Компактные теплообменники. — М.: Энергия, 1967. 223 с.
4. Бажан П. И., Каневец Г. Е., Селиверстов В. М. Справочник по теплообменным аппаратам. — М.: Машиностроение, 1989. 365 с.
5. Сулин А. Б. Приложение метода анализа чувствительности к расчету термоэлектрических кондиционеров // Вестник Международной академии холода. 2012. №2. С. 23–25.

6. Холодильные машины: Учеб. для студентов вузов специальности «Техника и физика низких температур»/А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев, Л. С. Тимофеевский; Под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. — СПб.: Политехника, 2006.

References

1. Hovalyg D., Baranenko A. V. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2012. №1. pp. 3–10.
2. Bogoslovskij V. N., Poz M. Ja. *Teplofizika apparatov utilizacii te-pla sistem otoplenija, ventiljacii i kondicionirovanija vozduha*. — М.: Strojizdat, 1988, 320 p.
3. Kejs V. M., London A. L. *Kompaktnye teploobmenniki*. — М.: Jenergija, 1967. 223 p.
4. Bazhan P. I., Kanevec G. E., Seliverstov V. M. *Spravochnik po teploobmennym apparatam*. — М.: Mashinostroenie, 1989. 365 p.
5. Sulin A. B. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2012. №2. pp. 23–25.
6. *Holodil'nye mashiny: Ucheb. dlja studentov vuzov special'nosti «Tehnika i fizika nizkih temperatur»/A. V. Baranenko, N. N. Buharin, V. I. Pekarev, L. S. Timofeevskij*. — SPb.: Politehnika, 2006.



Международная академия холода (МАХ) объявляет конкурсный прием

23 апреля 2014 г.

в актовом зале Института холода и биотехнологий НИУ ИТМО состоится
21-е Общее годовичное собрание Международной академии холода

Согласно Уставу, право выдвижения предоставляется: президиумам национальных и региональных отделений МАХ, международным организациям, высшим учебным заведениям, ученым и специалистам.

Кандидаты представляют в Секретариат МАХ следующие документы:

Для индивидуальных членов:

- заявление на имя Президента МАХ академика А. В. БАРАНЕНКО об участии в конкурсе с указанием: искомого академического звания и секции МАХ; места работы и занимаемой должности; гражданства; даты рождения (число, месяц, год); служебного и домашнего адресов, телефонов, факсов (с индексом страны и города), E-mail и сайта организации;
- ходатайство члена Академии о выдвижении кандидата (форма произвольная);
- три фотографии размером 3×4 см (черно-белые или цветные);
- краткая информация о научно-производственной деятельности кандидата, перечень основных научных трудов, предполагаемое направление личного участия в деятельности МАХ.

Для юридических лиц (коллективные члены):

- заявление руководителя организации на имя Президента МАХ академика А. В. БАРАНЕНКО с просьбой о вступлении;
- краткая характеристика основных направлений деятельности организации;
- почтовый адрес, телефон, факс, E-mail и сайт организации.

Документы отправляются по почте (с пометкой «На конкурс») или доставляются непосредственно по адресу: 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, офис 1102, главному ученому секретарю МАХ Ю.А. Лантеву.

Документы принимаются до 31 марта 2014 г.

Для справок:

Тел./факс: (812) 571-69-12

e-mail: max_iar@gunipt.spb.ru, laptev_yua@mail.ru