

На правах рукописи

ВАСЮТИНСКИЙ Сергей Юрьевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ И
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОСВЕННО-ИСПАРИТЕЛЬНЫХ
ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ

Специальность 05.04.03 - Холодильная
и криогенная техника, системы кондиционирования

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1996



00743845 (V)

024.5
 Работа выполнена в Оде
 холода и Научно-производств
 Госпищепрома Украины.

- Научный руководитель - доктор технических наук,
 профессор Дорошенко А.В.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
 профессор Недоступ В.И.;
 кандидат технических наук,
 профессор Онищенко В.П.
- Ведущая организация - Инженерно-технологический
 институт "Биотехника"

Защита состоится 27 декабря 1996 г. в 11 часов
 на заседании специализированного Совета Д 05.20.01 при Одесской
 государственной академии холода по адресу: 270100, г. Одесса,
 ул. Дворянская, 1/3, ученый совет ОГАХ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОГАХ.

Автореферат разослан 20 ноября 1996 г.

Ученый секретарь
 специализированного Совета
 доктор технических наук,
 профессор

В.А. Календерьян

20 ноября 1996 г.

Исх. № 03-88

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Решение проблемы рационального использования топливно-энергетических ресурсов, а также необходимость охраны окружающей среды, сокращения вредных выбросов требуют разработки новых способов охлаждения воздуха на основе естественных источников холода, использующих неравновесность окружающей среды.

Одним из таких способов является метод непрямого испарительного охлаждения воздуха, что обусловлено экологической чистотой, низкой стоимостью и энергопотреблением, простотой в обслуживании и надежностью охладителей (КИО), созданных с использованием этого метода. Процессы теплообмена в КИО отличаются сложностью, одновременное взаимодействие трех потоков предъявляет особые требования к организации их контактирования, методам интенсификации. Ранее проведенные исследования в основном носят экспериментальный характер, а существующие зависимости не замыкаются в общие методики экспериментального и математического моделирования процессов, происходящих в КИО и не позволяют создать методику расчета таких аппаратов. Создание методик, позволяющих комплексно решать проблему проектирования аппаратов КИО и определяет актуальность темы настоящей работы.

Основная цель работы – развитие научных основ инженерного конструирования косвенно-испарительных охладителей путем углубленного теоретического и экспериментального исследования течения тонких слоев вязкой жидкости, применительно к особенностям протекания процессов в КИО.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Проведение теоретического и экспериментального исследования процессов в КИО: течений пленки при малых расходах жидкости, особенностей течения по продольно-гофрированному листу с регулярной шероховатостью поверхности (РШ), соотношения влажно-сухих поверхностей и др.

2. Экспериментальное изучение процессов в КИО на натуральных образцах, разработка принципов конструктивного оформления воздухоохладителей и типоразмерного ряда таких аппаратов.

3. Создание математической модели процессов в КИО, учитывающей всю их сложность и позволяющей рассчитать основные параметры течения пленки, параметры потоков (температур и влагосодержаний).

4. Разработка компьютерной программы, обеспечивающей инже-

нерный расчет и проектирование КИО.

5. Анализ путей совершенствования СКВ с КИО, способствующих расширению диапазона климатических условий применимости метода и улучшения работоспособности.

Научную новизну исследований по теме работы составили:

1. Результаты моделирования процессов совместного тепломассообмена в КИО с учетом влажно-сухих поверхностей.

2. Методика и результаты экспериментального изучения особенностей волновых течений тонких слоев вязкой жидкости по вертикальной гофрированной поверхности с РШ, применительно к условиям эксплуатации КИО.

3. Методика и результаты экспериментальных исследований на многоканальных структурах, подтверждающие работоспособность модели и обеспечивающие получение расчетных зависимостей.

Научное положение, защищаемое в работе: минимизация энергозатрат и расхода рециркулирующей жидкости в воздухоохладителях косвенно-испарительного типа требует учета при моделировании рабочих процессов реального соотношения поверхностей тепломассообмена (по данным автора $\alpha = 0,3-0,4$) и стока тепла по ребру в неорошаемой области.

Практическая ценность работы. Разработанные методики совместного экспериментального и расчетно-теоретического моделирования на основе математической модели процессов, происходящих в КИО, позволяют рассчитать все основные параметры потоков и могут быть использованы для проектирования.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научных конференциях Одесской государственной академии холода, IV Международной конференции по экологии "Экология, продукты питания, здоровье" (г. Одесса, 1995), IV научно-практической конференции по вопросам развития и внедрения техники и технологий использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (АО Крым, 1995), Международной научно-технической конференции "Холод и пищевые производства", посвященной 65-летию основания Санкт-Петербургской государственной академии холода и пищевых технологий (Санкт-Петербург, 1996), научно-методической конференции "Человек и окружающая среда - проблемы непрерывного экологического образования в вузах" (Одесса, 1996).

Публикации. Основные материалы диссертации представлены в пяти печатных работах.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы, включающего 159 наименований, приложений. Работа изложена на 161 страницах машинописного текста, содержащего 41 рисунок, 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследований, указана научная новизна защищаемых положений и результатов, приведена общая характеристика работы.

В первой главе приводятся данные о перспективности использования возобновляемых источников энергии, сведения о конструкциях и схемных решениях существующих аппаратов КИО, методах интенсификации. Дан краткий обзор и конкретизировано использование метода энтальпийного потенциала, на основе которого в главе 3 дается анализ экспериментального материала. Приведен обзор существующих решений, позволяющих расширить область применения КИО. Отмечено, что проведенные исследования, результаты которых отражены в обширной печатной информации, в основном носили экспериментальный и интегральный характер, слабо изучены вопросы пленочного течения, вопросы снижения расхода воды и энергии, не разработана комплексная модель процессов, происходящих в КИО, существующие результаты в области моделирования ограничиваются развитием метода анализа процессов теплообмена (метод энтальпийного потенциала), отсутствует инженерный расчет, обеспечивающий конструирование аппаратов, область применения существующих методик ограничена рамками разработанных решений и геометрией поверхности. Анализ состояния проблемы позволил обосновать задачи исследований. На основе анализа существующих конструктивных решений выработаны новые решения, заключающиеся в использовании многоканальных структур с чередующимися влажными и сухими каналами (рис. 1а), при этом во влажных - движется вспомогательный поток и жидкостная пленка, в сухих - основной поток при неизменном влагосодержании, в многоканальной структуре используется продольнориленный лист с ПШ в качестве метода интенсификации (рис. 2). Вода, испаряясь, охлаждает вспомогательный поток воздуха, который, в свою очередь, через стенку обеспечивает охлаждение основного потока.

Во второй главе развиты модельные представления, обеспечивающие расчет всех основных параметров КИО. Реальности течения жидкостной пленки позволяют выделить три основные области

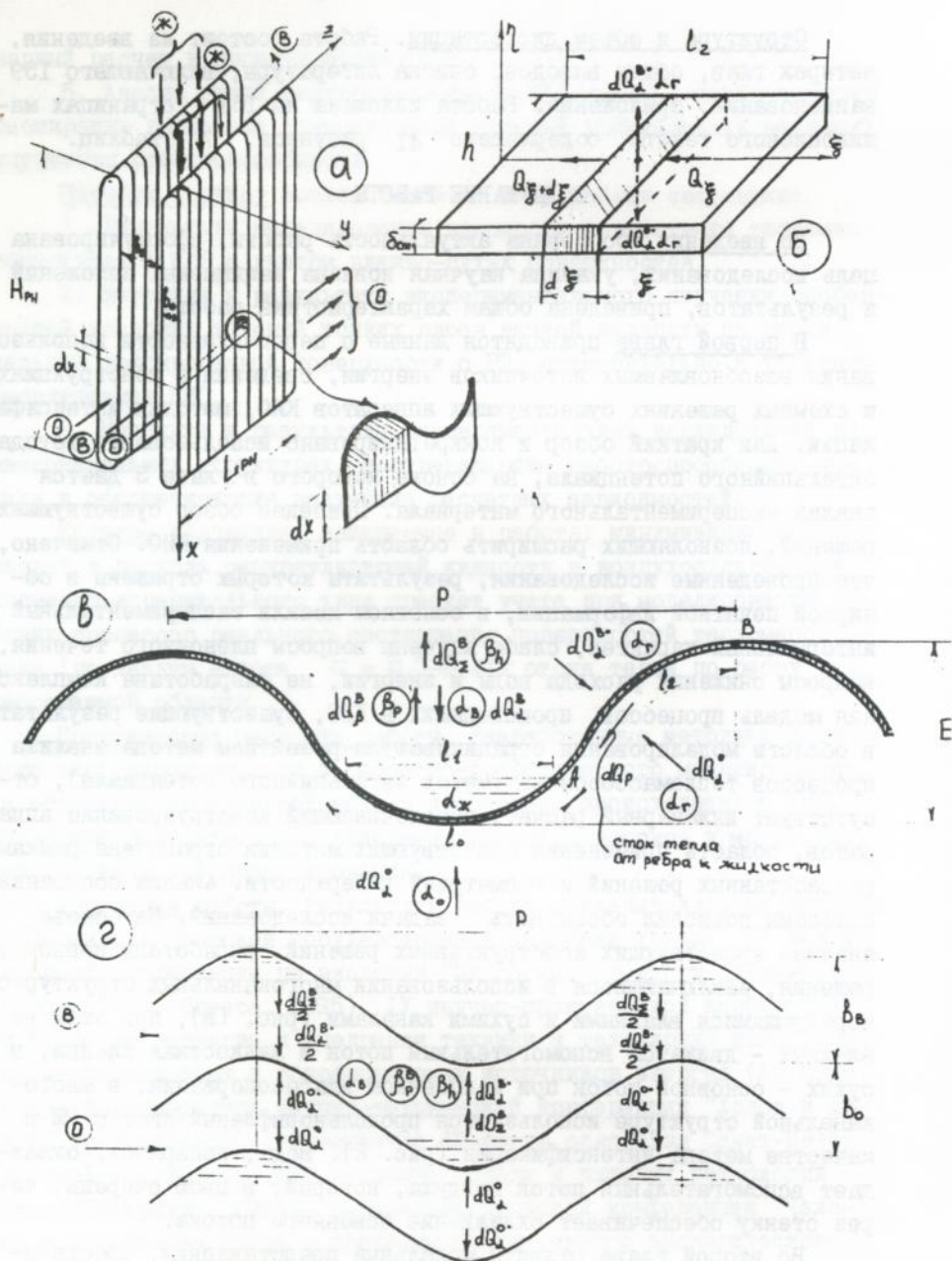


Рис. 1. К расчету процессов совместного тепло-массопереноса в косвенно-испарительном воздухоохладителе: а-компоновка насадки КИО; б-расчетная схема "ребра" КИО; в, г-расчетная схема КИО.

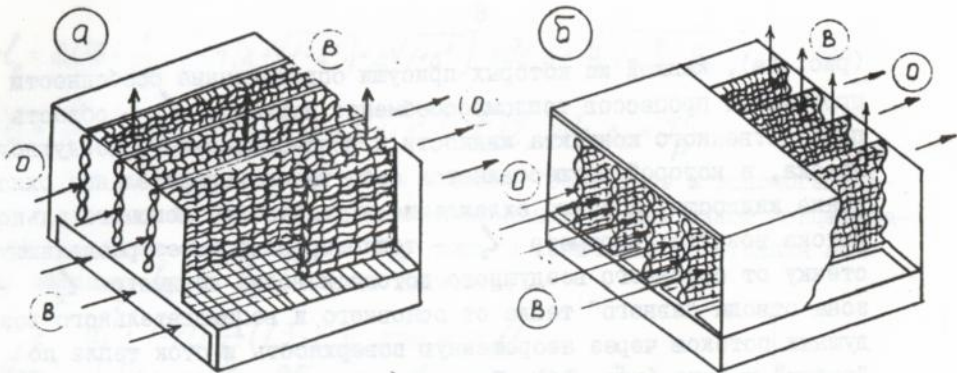


Fig. 2. Component scheme of the nozzle part of the KIO:
 a - cross-sectional scheme; b - perspective scheme.

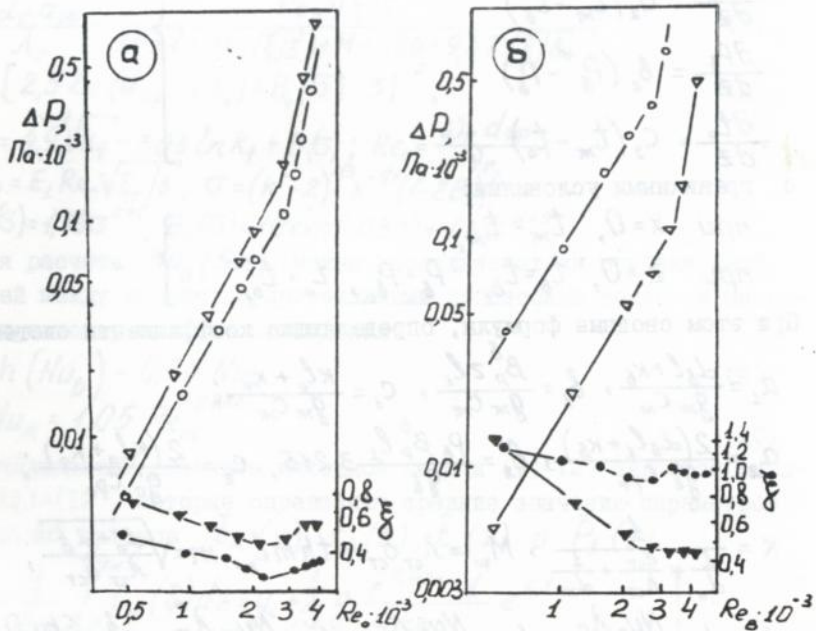


Fig. 3. Hydrodynamic characteristics of coolers /longitudinally ribbed plate/ - a-main channel/influence of PI/:
 ∇ PI-3P, \circ PI-4; b-auxiliary channel/influence of coating and location of ribs/: \circ PI-2P, ∇ PI-2.

(рис. 1в), каждой из которых присущи определенные особенности протекания процессов тепломассообмена: периметр l_1 - область непосредственного контакта жидкости и вспомогательного воздушного потока, в которой осуществляется собственно испарительное охлаждение жидкости, а также охлаждение и увлажнение вспомогательного потока воздуха; периметр l_0 - теплопередача через разделяющую стенку от основного воздушного потока к воде; периметр l_2 - зона отвода "явного" тепла от основного и вспомогательного воздушных потоков через неорошенную поверхность и сток тепла по "ребру" к воде (рис. 1б). Таким образом, все тепло в "явном виде" подводится к воде через поверхности l_0, l_1, l_2 (рис. 1в) и в "скрытом" виде отводится во вспомогательный поток, выносящий его из аппарата (рис. 1г). В основу моделирования положена система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dt_{ж}}{dx} &= a_1(t_6 - t_{ж}) + b_1(P_6 - P_6^*) + c_1(\bar{t}_r - t_{ж}) \\ \frac{dt_6}{dz} &= a_2(t_{ж} - t_6) \\ \frac{dP_6}{dz} &= b_2(P_6^* - P_6) \\ \frac{dt_0}{dz} &= c_2(t_{ж} - t_0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } x=0, \quad t_{ж} &= t_{ж1} \\ \text{при } z=0, \quad t_6 &= t_{61}, \quad P_6 = P_{61}, \quad t_0 = t_{01} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При этом сводные формулы, определяющие коэффициенты системы (1):

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{d_6 l + K_6}{g_{ж} c_{ж}}, \quad b_1 = \frac{B_p \delta l_1}{g_{ж} c_{ж}}, \quad c_1 = \frac{K l_0 + K_0}{g_{ж} c_{ж}}; \\ a_2 &= \frac{2(d_6 l_1 + K_6)}{g_6' c_{pr}}, \quad b_2 = \frac{P_6 B_p \delta l_1}{g_6'} \cdot 3,215, \quad c_2 = \frac{2(K l_0 + K_0)}{g_0' c_{pr}}; \\ K &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{ж}}}, \quad M_w = \lambda_{ст} \delta_{ст} m t h m l_2, \quad m = \sqrt{\frac{\alpha_0 + \alpha_6}{\lambda_{ст} \delta_{ст}}}; \\ \alpha_r &= \alpha_0 = \frac{Nu_0 \lambda_r}{d_{30}}, \quad \alpha_6 = \frac{Nu_6 \lambda_r}{d_{36}}, \quad \alpha_{ж} = \frac{Nu_{ж} \lambda_{ж}^*}{d_{36}}, \quad P_p = \frac{Sh \cdot D}{d_{36}}; \\ K_0 &= M_{ст} \left[\frac{\alpha_0 - \alpha_6}{\alpha_0 + \alpha_6} + K \left(\frac{1}{\alpha_0} - \frac{1}{\alpha_{ж}} \right) \right], \quad K_6 = \frac{2 M_{ст} \alpha_6}{\alpha_0 + \alpha_6}; \\ l_1 &= 2AB = 2Z_0 = PV \delta_{ж}^* \quad (\text{см. рис. 1}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$l_0 = 20B = \frac{P^2}{16E} [\ln(\Delta + \sqrt{1 + \Delta^2}) + \Delta \sqrt{1 + \Delta^2}], \text{ где } \Delta = -\frac{4}{P} \sqrt{2\delta_{ж} E} \quad (4)$$

$$l_2 = \frac{P^2}{16E} [\ln(\Delta_1 + \sqrt{1 + \Delta_1^2}) + \Delta_1 \sqrt{1 + \Delta_1^2}] - l_0/2, \text{ где } \Delta_1 = \frac{4E}{D} \quad (5)$$

Для рассматриваемой схемы движения основного и вспомогательного потоков по системе искривленных каналов идентичной конфигурации (различие между d_{30} и d_{36} лишь в величинах расстояния между листами b_0 и b_6) можно записать:

$$d_{3\varphi}^2 = \left. \begin{aligned} & d_0^2 \left[1 - 20 \frac{E_1}{k} (1.3 - E_1) \right], \text{ при } k > 11 \\ & d_3^2 \left[(1 - 2E_1)^2 + \frac{2E_1}{243k} (k-2)^2 (27 - 58E_1 + 2E_1 k) \right], \text{ при } k < 11, \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\text{где } d_3 = \frac{16b(1+4)}{5\lambda^2 + 6\lambda + 5}, \lambda = \sqrt{1 + \left(\frac{QE}{P}\right)^2};$$

$$E_1 = E_0/d_3, E_0 = E - \delta_{ж}, k' = P/E_0.$$

Для расчета чисел Нуссельта Nu_0 и Nu_6 в первом приближении использованы формулы, обобщающие опытные данные по теплоотдаче в каналах (трубах) с двумерной однородной шероховатостью:

$$Nu_r = \frac{\alpha_r d_{3\varphi}}{\lambda_r} = \frac{Re_r \sqrt{\xi/8}}{3.03 \ln(Re_r \sqrt{\xi/8}) + M - 5.86 + 9.57 \sqrt{\xi/8}}, \quad (7)$$

$$\xi = 8 \left[2.5 \ln(d_{3\varphi}/2E_0) + B_0(G) - 3 \right]^{-2}, \quad (8)$$

$$\text{где } M = 4.9 \sqrt{k_f} - 3.03 \ln k_f + B(G); Re_r = \frac{\omega_r d_{3\varphi}}{\nu_r},$$

$$k_f = E_1 Re_r \sqrt{\xi_r/8}, G = (k-2)^{2/3} k^{1/3} (1 - 2E_1)^2,$$

$$B(G) = 1.79 G^{0.45}, B_0(G) = 10 \exp(-0.3G) + 1.5 G^{0.45}.$$

Для расчета Nu_D (Sh) можно воспользоваться приближенной аналогией между совместно протекающими процессами тепло- и массообмена при испарительном охлаждении:

$$Sh(Nu_D) = 0.95 Nu_r \quad (9)$$

$$Nu_{ж} = 1.05 Re_{ж}^{-0.282} \quad (10)$$

Приближенным решением исходной задачи (I)-(2) являются выражения (II)-(I2), которые определяют средние значения параметров материальных потоков $\bar{t}_x(x)$, $\bar{t}_y(z)$, $\bar{t}_o(z)$ и $\bar{P}_y(z)$

$$\left. \begin{aligned} \bar{t}_x(x) &= \frac{1}{L_{PH}} \int_0^{L_{PH}} \bar{t}_x(\xi) dz = g_i + \sum_{i=2}^4 g_i \frac{e^{x_i L_{PH}} - 1}{x_i L_{PH}} e^{x_i x} \\ \bar{t}_y(z) &= \frac{1}{L_{PH}} \int_0^{L_{PH}} \bar{t}_y(\xi) dx = g_i + a_2 \sum_{i=2}^4 g_i \frac{e^{x_i H_{PH}} - 1}{x_i H_{PH} (x_i + a_2)} e^{x_i z} \\ \bar{P}_y(z) &= \frac{1}{H_{PH}} \int_0^{H_{PH}} \bar{P}_y(\xi) dx = m + n g_i + b_2 n \sum_{i=2}^4 g_i \frac{e^{x_i H_{PH}} - 1}{x_i H_{PH} (x_i + b_2)} e^{x_i z} \\ \bar{t}_o(z) &= \frac{1}{H_{PH}} \int_0^{H_{PH}} \bar{t}_o(\xi) dx = g_i + c_2 \sum_{i=2}^4 g_i \frac{e^{x_i H_{PH}} - 1}{x_i H_{PH} (x_i + c_2)} e^{x_i z} \end{aligned} \right\} (II)$$

$$\left. \begin{aligned} g_i + \sum_{i=2}^4 g_i \frac{e^{x_i L_{PH}} - 1}{x_i L_{PH}} = t_{ж}^{\circ}; \quad g_i + a_2 \sum_{i=2}^4 g_i \frac{e^{x_i H_{PH}} - 1}{x_i H_{PH} (x_i + a_2)} = t_{б}^{\circ} \\ n g_i + b_2 n \sum_{i=2}^4 g_i \frac{e^{x_i H_{PH}} - 1}{x_i H_{PH} (x_i + b_2)} = P_{б}^{\circ} - m; \quad g_i + c_2 \sum_{i=2}^4 g_i \frac{e^{x_i H_{PH}} - 1}{x_i H_{PH} (x_i + c_2)} = t_{о}^{\circ} \end{aligned} \right\} (I2)$$

где H_{PH} , L_{PH} - высота и длина насадки КИО в направлении движения потоков жидкости и воздуха, соответственно. Из (II)-(I2) легко определяются значения основных параметров всех потоков на выходе из КИО по заданным исходным параметрам и расходам потоков. Расчетные результаты находятся в хорошем согласовании с экспериментальными данными.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования на 8 модулях размерами 250x400x500 мм $d_{30} = 8+18,3$ мм, $d_{36} = 9,7+19,8$ мм; $\omega_0 = 1-15$ м/с, $\omega_8 = 1-10$ м/с, $G_0 = 300-800$ м³/ч, $\chi_p = (5-12) \cdot 10^{-3}$ кг/кг. Ниже анализируются модули П-1 ($d_{30} = 8,0$ мм, $d_{36} = 19,8$ мм), (8,0 мм, 12,8 мм, соответственно); П-2 (8,0 мм, 9,7 мм), П-3 (9,8 мм, 12,8 мм), П-4 (9,8 мм, 12,8 мм), П-5 (18,3 мм, 13,6 мм), П-6 (16,4 мм, 15,4 мм); знак "П" после названия модуля означает дополнительное использование гигроскопического покрытия. При анализе использован опытный материал, ранее накопленный в ОГАХ, дополнительное исследование выполнено методом электропроводности на одноканальных моделях (получено в опытах: $\delta_{ж} = 0,41-1,18$ мм, $a_{НТО} = 0,3-0,5$).

Для воздухоохладителей с горизонтальным расположением основного гофра (поперечнорифленный лист) единственным решением, обеспечивающим сплошное течение пленки является использование капиллярно-пористого покрытия. На стороне основного потока ПШ приводит к росту гидравлического сопротивления и теплообмена (рис. 4а), причем комплекс $A = (Nu/Nu) (\xi/\xi)$ составляет в среднем 0,8-1,05. Значительно усложняется и гидродинамическая картина (рис. 3б). Незначительный рост сопротивления соответствует интенсификации теплообмена (рис. 4б), что обусловлено увеличением площади контакта потоков В и жидкости. Величина $A^* = (Sh/Sh) (\xi/\xi)$ составляет в среднем 2,0. Интенсифицируя теплообмен, покрытие приводит к усложнению технологии изготовления модуля, росту его стоимости и снижает надежность и долговечность. Переход к вертикальной гофрировке листа обусловлен желанием исключить гигроскопическое покрытие, сохранив при этом высокую эффективность КИО. Использование ПШ на стороне основного потока практически не влияет на гидродинамику течения и теплоотдачу (рис. 3а, 4в); эффективность применения проставочных листов очевидна, хотя величина от-

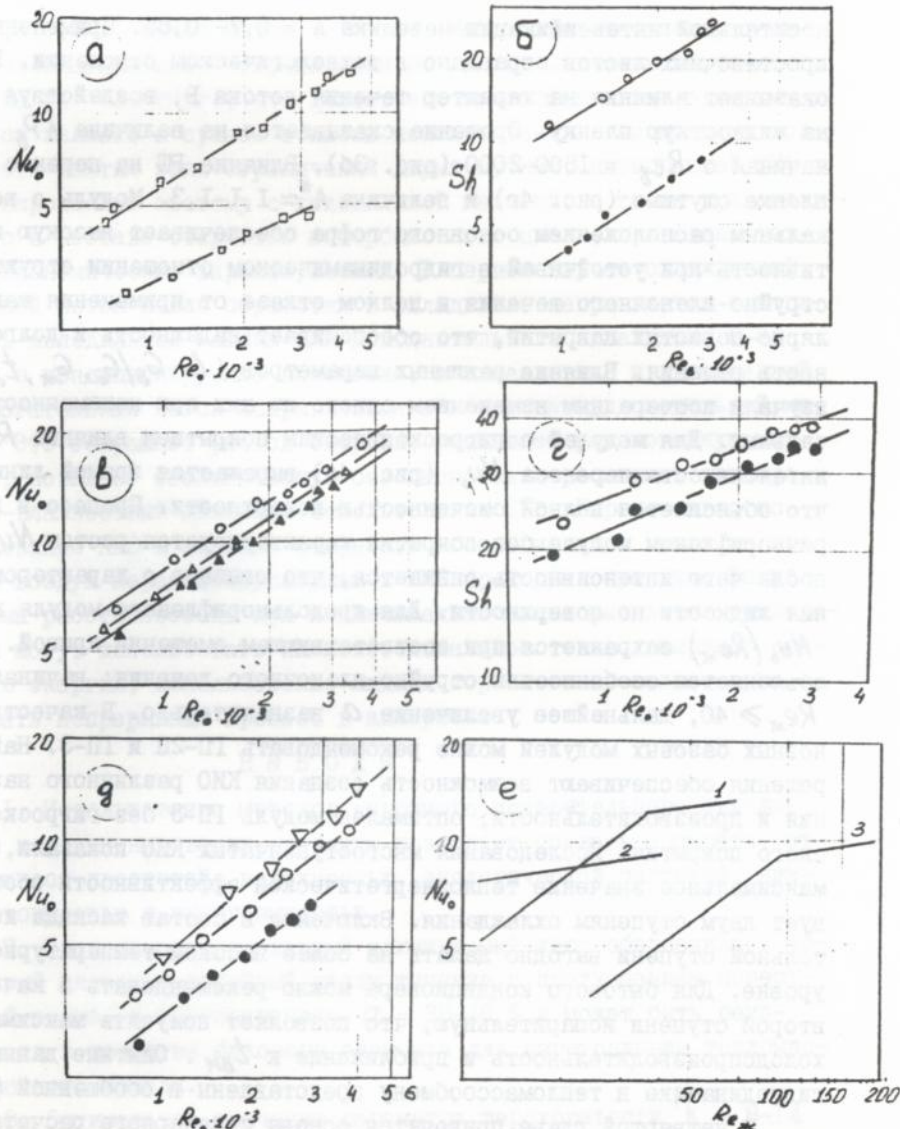


Рис. 4. Галетно-пластинчатый модуль: а, б — поперечнорифленый лист; в, г — продольнорифленый лист. Влияние ПШ на интенсивность теплоотдачи/а/: □ ГП-П/гладкий канал/, ■ ГП-1; $Re_0 = 1E00$, $Re_{\text{см}} = 115$. Влияние гигроскопического покрытия на интенсивность массоотдачи/б/: ● ГП-1, ○ ГП-4П; $Re_0 = 2900$; $Re_{\text{см}}$ для ГП-1 → 110, для ГП-4П → 40. Зависимость $Nu_i(Re_i)/в/$: $Re_0 = 1900$; $Re_{\text{см}} = 115$; ○ ГП-3П, △ ГП-3, ▲ ГП-4. Зависимость $Sh(Re_h)/г/$: $Re_0 = 2E00$; $Re_{\text{см}} = 105$; ○ ГП-3, ● ГП-4/влияние ПШ в "сухой" части модуля. Зависимость $Nu_i(Re_i)$ для смешанной схемы движения основного потока/д/: ● ГП-5; ○ ГП-6П, ▽ ГП-5П; $Re_0 = 1E00$; $Re_{\text{см}} = 80$. Влияние орошающей жидкости/е/: 1, ГП-1; 2, ГП-4П; 3, ГП-3.

носительной интенсификации невелика $A = 0,7 - 0,85$. Применение проставочных листов оправдано в технологическом отношении. $PIII$ не оказывает влияния на характер течения потока B , воздействуя лишь на жидкостную пленку. Орошение сказывается на величине ΔP_f лишь начиная с $Re_g = 1800 - 2000$ (рис. 3б). Влияние $PIII$ на перенос в пленке ощутимо (рис. 4г) и величина $A^* \approx 1,1 - 1,3$. Модуль с вертикальным расположением основного гофра обеспечивает высокую эффективность при устойчивой в гидродинамическом отношении структуре струйно-пленочного течения и полном отказе от применения капиллярно-пористых покрытий, что обеспечивает надежность и долговечность решения. Влияние режимных параметров ($l = G_0/G_0, G_{ж}, t_0, t_{BM}$) изучали поочередным изменением одного из них при неизменности остальных. Для модулей с гигроскопическим покрытием влияние $Re_{ж}$ на интенсивность переноса Nu_0 (рис. 4е) выражается прямой линией, что объясняется полной смоченностью поверхности. Процесс в поперечнорифленом модуле без покрытия характеризуется ростом Nu_0 , после чего интенсивность снижается, что связано с характером течения жидкости по поверхности. Для продольнорифленого модуля вид $Nu_0(Re_{ж})$ сохраняется при соответствующем смещении кривой. Это объясняется особенностью струйно-пленочного течения: начиная с $Re_{ж} \geq 40$, дальнейшее увеличение a незначительно. В качестве основных базовых модулей можно рекомендовать ПИ-2П и ПИ-3. Найденные решения обеспечивают возможность создания КИО различного назначения и производительности; оптимален модуль ПИ-3 без гигроскопического покрытия. Исследования многоступенчатых КИО показали, что максимальное значение теплоэнергетической эффективности соответствует двум ступеням охлаждения. Включение в состав каскада испарительной ступени выгодно делать на более высоком температурном уровне. Для бытового кондиционера можно рекомендовать в качестве второй ступени испарительную, что позволяет получить максимальную холодопроизводительность и приближение к t_{BM} . Опытные данные по гидродинамике и тепломассообмену представлены в обобщенной форме.

В четвертой главе приводятся основы инженерного расчета КИО на основе выполненных исследований и дан пример такого расчета. Исследования позволили создать натуральный образец КВК-0,5 (производительность по воздуху - 1350 м^3 , холодопроизводительность при температуре наружного воздуха 32°C и относительной влажности 35% - 2,1 кВт, суммарная потребляемая мощность - 0,32 кВт, уровень шума в квартире - не более 38 дБ, габаритные размеры

0,4x0,6x0,8 м, сухая масса - 30 кг). Метод косвенно-испарительного охлаждения имеет ограничения по влагосодержанию окружающего воздуха ($X = 14$ г/кг), что делает его малоэффективным в жарком и влажном климате и сужает область использования. Рассмотрены возможности снятия этих ограничений двумя путями: интеграцией КИО в комбинированную систему с холодильной машиной, а также применением его в составе открытого абсорбционного цикла; приведены технико-экономические характеристики. В первом случае охлажденный основной поток после обработки в охладителе направляется в испаритель холодильной машины для дополнительного охлаждения и затем - в кондиционируемое помещение, а охлажденный и увлажненный вспомогательный поток направляется в конденсатор холодильной машины. Это сокращает расход энергии, уменьшает установочную мощность, повышает экологическую безопасность и расширяет температурно-влажностный диапазон использования СКВ. Перспективно использование КИО в составе открытого абсорбционного цикла, в котором воздух перед поступлением в КИО проходит осушение. Такие системы работоспособны при исключительно малых разностях температур и могут использовать низкопотенциальное тепло, например солнечную энергию, использование жидких сорбентов позволяет организовать непрерывный процесс в аппаратах.

В В О Д Ы

1. Использование методов непрямого испарительного охлаждения в кондиционировании воздуха позволяет создать аппараты, отличающиеся простотой, надежностью, экологической чистотой, низкой стоимостью и энергоемкостью.

2. Продольногoffрированный алюминиевый лист обеспечивает устойчивый пленочно-струйный режим течения с соотношением поверхностей тепло- и массопереноса $\alpha = 30-40\%$ и может быть рекомендован в качестве базового элемента для изготовления тепломассообменного модуля.

3. Оптимальное значение параметра шероховатости $k = 8-14$ обеспечивает максимальную интенсивность протекания процессов переноса в жидкостной пленке при регулярно-волновом режиме течения.

4. Получены значения максимальной толщины струи жидкости (пленочно-струйное течение жидкости в насадке модуля КИО), текущей по впадинам гофрированной поверхности для условий поперечно-

точного взаимодействия воздушных потоков и жидкости.

5. Моделирование процессов теплообмена при непрямом испарительном охлаждении выполнено с учетом реальностей распределения влажно-сухих поверхностей при пленочно-струйном течении жидкости, решение представлено в виде системы алгебраических уравнений, обеспечивающих возможность определения всех основных параметров потоков и прогнозирования характеристик КИО.

6. Конструктивное оформление насадки КИО в виде многоканальной структуры с чередующимися влажными (вспомогательный поток - рециркулирующая жидкостная пленка) и сухими (основной поток) каналами, образованными из сложногофрированных листов с ПШ поверхности, обеспечивает компактность охладителя, низкие энергозатраты и требуемую герметичность каналов.

7. Экспериментальное исследование, выполненное на многоканальных КИО, позволило рекомендовать в качестве базового решения продольноориентированный вертикальный лист с ПШ без применения капиллярно-пористых покрытий для противо- и поперечноточной схем контактирования, при этом рекомендуются значения: $d_{30} = 9,8$ мм, $d_{3в} = 12$ мм, $k = 8-14$; по режимным параметрам: $\omega_0 = 3-4$ м/с, $\omega_6 = 4-7$ м/с, $q_{ж} = 3-4,5$ кг/(м²·с). Опытные данные обобщены в виде расчетных зависимостей.

8. Инженерная методика расчета обеспечивает сквозной взаимосвязанный расчет всех основных элементов системы, что убедительно подтверждает результаты натурных испытаний опытного образца КИО.

9. В качестве перспективных решений, обеспечивающих расширение температурно-климатического диапазона применимости КИО, рассмотрены комбинированная схема с холодильным агрегатом, а также интеграция КИО в открытую абсорбционную систему и выполнен технико-экономический анализ таких решений.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Дорошенко А.В., Васютинский С.Ю., Бахи Махер Бен Саид. Экологически чистые методы в кондиционировании воздуха // Тез. док. IУ Междунар. конф. по экологии "Экология, продукты питания, здоровье" (Одесса, 3-5.X.1995). - Одесса, 1995. - С. 12.

2. Васютинский С.Ю., Ярмолович Ю.Р. Новые перспективные направления в кондиционировании воздуха / Одес. гос. академия холода. - Одесса, 1995. - 42 с. - Библиогр.: 48 назв. - Деп. в ГНТБ Украины 28.08.95, № 1975-Ук 95.

3. Дорошенко А.В., Васютинский С.Ю. Использование неравновесности окружающей среды для решения задач кондиционирования воздуха // Тези доп. IУ наук.-практ. конф. з питань розвитку й впровадження техніки і технологій використання нетрадиційних і

Відновлюваних джерел енергії (7-12.IX.1995, АР Крим). - Київ, 1995. - С. 68.

4. Дорошенко А.В., Васютинский С.Ю., Бахи Махер Бен Саид. Использование процессов непрямого испарительного охлаждения воздуха в системах кондиционирования воздуха // Тез. док. Междунар. науч.-техн. конф. "Холод и пищевые производства" (Санкт-Петербург, 22-24.X.1996). - С.-П., 1996. - С. 306.

5. Васютинский С.Ю. Экологически чистые системы кондиционирования воздуха // 36. наук. праць У наук.-метод. конф. "Людина та навколишнє середовище - проблеми безпервної екологічної освіти в вузах" (Україна, Одеса, 16-18.IX.1996). - Одеса, 1996. - С. 54-55.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ: Q - тепловая нагрузка, кВт; G - объемный расход, м³/с; ω - скорость, м/с; N - мощность, кВт; q_r - плотность теплового потока, кВт/м²; t - температура, °С;

x - влагосодержание, кг/кг; P - давление, Па; d - диаметр, м; E - высота основного гофра, м; l - определяющий размер, м;

Q_{mto} - соотношение поверхностей тепло- и массообмена; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления; δ - толщина пленки жидкости, м; λ - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); λ - коэффициент массоотдачи (учитывает перенос тепла массой пара), кг/(м²·с);

K - коэффициент теплопередачи (учитывает перенос тепла массой пара), Вт/(м²·с); Re - число Рейнольдса; Nu - число Нуссельта;

$Sh(Nu_D)$ - число Шервуда (Нуссельта диффузионного).

ИНДЕКСЫ: Г, Ж - газ, жидкость; о, в - основной, вспомогательный; э, эф - эквивалентный, эффективный; м - мокрый термометр;

* - критический, граничный, поверхность раздела фаз;

- - знак усреднения величины.

СОКРАЩЕНИЯ: СКВ - система кондиционирования воздуха, КИО - охладитель косвенно-испарительного типа; РШ - регулярная шероховатость поверхности.

А Н О Т А Ц І Я

Васютинський С.Ю. Моделювання робочих процесів та удосконалення непрямо-випарних повітроохолодників

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.04.03 - Холодильна та криогенна техніка, системи кондиціонування, Одеська державна академія холоду, Одеса, 1996 р.

438668

Розроблено і обгрунтовано методику моделювання процесів сумісного тепломасообміну під час непрямого випарного охолодження, яка враховує реальні розподілення поверхонь переносу на сухих та зрошуваних поверхнях.

Методики і результати експериментального дослідження на одноканальних (методом електропровідності) та многоканальних насадках НВО викладені та обгрунтовані, а також проведено узагальнення здобутого експериментального матеріалу.

На цій основі розроблена конструкція НВО, проаналізовані шляхи усунення обмежень за кліматичними зонами застосування метода охолодження.

Ключові слова: непряме випарне охолодження, тепломасообмін, регулярна шорсткість, многоканальна насадка, системи кондиціонування повітря.

SUMMARY

Vasvutinsky S. J. Working Process Modeling and Indirect Evaporative Coolers Improvement.

Thesis for a scientific degree of Candidate of Science (Engineering) Speciality: 05.04.03 - Refrigeration and Cryogenics. Air Conditioning Systems. Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa. 1996.

The mathematical modeling methods of the combined heat-and-mass transfer processes in the indirect evaporative cooling, which take into account the reality of the transfer surfaces distribution of the dry and wet surfaces, have been worked out and motivated.

The methods and experimental investigation on the one-channeled (the electroconductivity method) and many-channeled IEC nozzles have been presented and motivated and the generalization of obtaining experimental material has been carried out.

The IEC construction was developed on this basis, the ways of removing limitations in climate zones applicability of cooling method have been analyzed.

Keywords: Indirect evaporative cooling, heat-and-mass transfer, regular roughness, many-channeled nozzle, air-conditioning system.

