

169 *проф. Гушаку Л. Б.*

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ЛОГАЧЕВСКИЙ Виктор Иванович

На правах рукописи

УДК 621.565.3:532.516

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН В АППАРАТАХ ПЛЕНОЧНОГО
ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СО СЛОЖНОПРОФИЛИРОВАННЫМИ
НАСАДКАМИ

Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты холодильной
и криогенной техники и систем
кондиционирования

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Одесса - 1988

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
холодильной промышленности

Научный руководитель - кандидат технических наук, старший
научный сотрудник
ДОРОШЕНКО А.В.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
ЧЕПУРНИКОВ В.П.
кандидат технических наук
ШАРГОРОДСКИЙ Ф.Н.

Ведущая организация - Государственный научно-исследовательский
и проектный институт азотной про-
мышленности и продуктов органического
синтеза (ГИАП)

Защита состоится 26 сентября 1988 г. в 11:00 часов
на заседании специализированного совета К.068.27.01 при Одес-
ском технологическом институте холодильной промышленности по
адресу: 270057, г.Одесса-57, ул. Петра Великого, 1/3, ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " _____ 1988 г.

* секретарь
ного совета

Р.К.Никольский

$= 8^2 / 7,5 = 8,5 \text{ Вт}$
ток нагрузки:
 $c = 1,07 \text{ А}$

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Пленочное течение жидкостей широко исполь-
зуется в химической и пищевой промышленности, теплоэнергетике, хо-
лодильной технике и т.д. для осуществления многих технологических
процессов, связанных с тепломассообменом (ТМО), фазовыми и хими-
ческими превращениями.

Исследованию гидродинамики пленочных течений посвящено боль-
шое количество работ, но большинство из них выполнено для течения
по гладким поверхностям. Однако одним из эффективных путей интен-
сификации процессов ТМО, уменьшения металлоемкости оборудования
на современном этапе развития техники является использование по-
верхностей с искусственной регулярной шероховатостью (РШ) из эле-
ментов оптимальных размеров и конфигурации, что позволяет, как ус-
тановлено, в 2-6 раз увеличить коэффициенты переноса.

Анализ немногочисленных литературных данных изучения характе-
ристик пленочного течения по поверхностям с РШ приводит к выводу,
что результаты носят негολный, разрозненный, а иногда и противоре-
чивый характер, что объясняется сложностью самой природы данного
вида движения. Все это порождает необходимость дальнейшего как
теоретического, так и экспериментального изучения гидродинамики
пленочных течений и тепломассообмена в широком диапазоне.

Диссертационная работа выполнена в рамках комплексной прог-
раммы 0.55.05 Госстроя СССР на XI-XII пятилетки "Разработать
новые и экономичные системы КВ с применением управляемых про-
цессов тепло- и влагообмена и комбинированных систем с естест-
венными и искусственными источниками холодоснабжения" (совме-
стное постановление Госстроя СССР, ГКНТ и Госплана СССР
№ 234/592/271 от 31.12.80).

Цель работы и задачи исследования. Работа посвящена ана-
литическому и экспериментальному исследованию пленочного течения
по плоским поверхностям с РШ и струйнопленочного течения по гоф-
рированным с РШ поверхностям, определению характеристик регуля-
рных насадок (РН) пленочных аппаратов контактной обработки
газов и жидкостей с целью получения более обоснованных методов
расчета ТМО аппаратов и улучшения их технических характеристик.

XV 1249
Институт холода
ОНАХТ
Библиотека

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) аналитически описать течение вязкой жидкости по рифленой поверхности во взаимосвязи с газовым потоком; 2) провести сопоставление теоретических и экспериментальных результатов исследования на одноканальных моделях; 3) определить оптимальные геометрические параметры элементов насадок (ЭН), обеспечивающих наибольшую эффективность ТМО процессов; 4) исследовать регулярные насадки, собранные из оптимальных элементов, в процессе теплообмена при испарительном охлаждении воды; 5) получить расчетные формулы, пригодные для инженерной практики.

Научные положения, защищаемые в работе.

1. Волновое течение пленки жидкости по вертикальной поверхности с РШ описывается линейной теорией в случае $\xi = \nu/\delta_N < 1$, при этом длинные бегущие волны и стоячие волны мало отличаются от синусоидальных, и нелинейной - в случае $\xi \geq 1$, при этом форма стоячей волны существенно отличается от синусоидальной, а бегущие волны представляют собой лишь рябь на их поверхности. Интенсивность волнообразования зависит от относительной высоты РШ.

2. Расчет процессов теплообмена в регулярных насадках, собранных из вертикальных гофрированных вдоль течения листов, следует проводить с учетом реальных значений площадей смоченной поверхности и неорошенных зон; струйно-пленочное течение по таким поверхностям является более устойчивым, чем сплошное пленочное течение, в широком диапазоне расходов по жидкости и газу, периода и высоты гофрирования при противоточном и поперечном токе контактирующих фаз, ввиду наличия отрицательной кривизны поверхности пленки.

Научные результаты, полученные в работе.

1. В рамках линейной и нелинейной теорий получено периодическое решение уравнений Навье-Стокса, описывающее регулярно-волновой режим пленочного течения по вертикальной поверхности с РШ с учетом касательного напряжения на границе жидкость-газ.

2. Теоретически доказана возможность существования резонансного режима течения при выполнении условия $\omega_1^2 = \rho_1$, который характеризуется максимумом амплитуды стоячей волны.

3. В широком диапазоне изменения параметра шероховатости экспериментально исследован режим пленочного течения, выделен промежуток оптимального проявления РШ, в котором обеспечивается максимальная интенсификация процессов переноса, найдены корреляционные зависимости для δ^* , Re^* .

4. Показано, что введение гофрировки листа по направлению течения приводит к струйно-пленочному течению по его поверхности

при сохранении особенностей, выявленных для плоского листа с РШ.

5. Проведен расчет параметров струйно-пленочного течения по гофрированной поверхности параболического профиля, позволивший установить реальные значения площадей поверхностей теплообмена и теплообмена. Результаты хорошо согласуются с опытными данными.

6. Показано, что РН из листов с оптимальными размерами основной гофрировки и РШ обеспечивают интенсификацию ТМО в обеих фазах во всем исследованном диапазоне нагрузок по жидкости и газу.

Научная новизна. Впервые предложена общая методика расчета реальных поверхностей теплообмена регулярных насадок с учетом особенностей течения вязких жидкостей по криволинейным поверхностям.

Практическая ценность работы. Проведенные исследования позволяют глубже понять гидродинамику и кинетику процессов теплообмена при пленочном течении жидкости по шероховатым и гофрированным поверхностям, а полученные корреляционные зависимости обеспечивают инженерный расчет пленочных ТМО аппаратов при их проектировании.

Реализация работы. Полученные результаты использованы при разработке вентиляторных противоточных градирен типа ГРН в виде типоразмерного ряда, поперечноточных градирен типа ГРН/П, косвенно-испарительных воздухоохлаждателей типа БКВО.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Всесоюзной научной конференции "Метод функций А.М.Ляпунова в современной математике" (Харьков, 1986); Всесоюзной научно-практической конференции "Интенсификация производства и применения искусственного холода" (Ленинград, 1986); Республиканской научной конференции "Дифференциальные и интегральные уравнения и их применения" (Одесса, 1987); Всесоюзной научно-практической конференции "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса" (Кишинев, 1987); научных конференциях ОТИХИ (Одесса, 1980-1987).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы (192 наименования) и приложения. Работа изложена на 108 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы и практическая значимость.

В первой главе на основе анализа имеющихся литературных данных по изучению насадок тепломассообменных аппаратов и гидродинамики пленочных течений перечислены достоинства пленочных ТМО аппаратов и целесообразность применения в области положительных температур (испарительное охлаждение газов и жидкостей), показана перспективность использования плоскопараллельных насадок со сложнопрофилированными поверхностями и необходимость аналитического решения задачи о течении тонких пленок жидкости по поверхности с ПШ, сформулирована цель работы и задачи исследования.

Во второй главе, исходя из уравнений Навье-Стокса и неразрывности

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) + g,$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

с граничными условиями

$$V_x = V_z = 0 \text{ при } x = f(z),$$

$$V_x = \frac{\partial h}{\partial t} + V_z \frac{\partial h}{\partial z} \text{ при } x = h(z, t)$$

$$-4\mu \frac{h'_z}{1+h'_z} \frac{\partial V_x}{\partial z} + \mu \frac{1-h'^2_z}{1+h'^2_z} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = \tilde{\tau}_r \text{ при } x = h(z, t)$$

$$-\rho_j - 2\mu \frac{1-h'^2_z}{1+h'^2_z} \frac{\partial V_z}{\partial z} - 2\mu \frac{h'_z}{1+h'_z} \left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -p_r + \frac{\sigma h''_z}{(1+h'^2_z)^{3/2}} \text{ при } x = h(z, t),$$

показано, что при $\epsilon/\delta_n = \delta \ll 1$, $\delta_n/\rho = \alpha < 1$ ($\alpha^2 \ll 1$), $1/Re_{na} \sim \alpha$, задача о движении тонкого слоя вязкой жидкости по поверхности с ПШ сводится к решению уравнений пограничного слоя и неразрывности, а ее решение осуществимо в рамках линейной теории;

при $\epsilon < 1$, $\alpha < 1$ ($\alpha^2 \ll 1$) и $1/(\alpha Re_{na}) \sim \alpha^2$ - к нелинейному дифференциальному уравнению третьего порядка, а ее решение осуществимо в рамках квазилинейной теории.

Для линейного случая получено аналитическое решение задачи. Показано, что как в отсутствии газового потока, так и при его наличии, регулярно-волновой режим на поверхности пленки представляет собой суперпозицию бегущей и стоячих волн, отличающихся по фазе от частоты гофрирования, вычислены волновые характеристики (амплитуда, частота, фазовая скорость), толщина пленки. Выявлен резонансный режим течения, характеризующийся максимумом амплитуды стоячей волны, который имеет место при выполнении условия $\omega_1^2 = \rho_1$. Для такого режима течения волнообразование будет наиболее развито, достигается наибольшая эффективность по тепломассообмену пленочного аппарата в условиях устойчивого волнового режима.

Для квазилинейного случая при $\tilde{\tau}_r = 0$ задача сведена к бесконечной системе линейных неоднородных дифференциальных уравнений 3-го порядка, для определения периодического решения предложен алгоритм, позволяющий с помощью рекуррентных соотношений представить решение в виде суммы ряда Фурье. Эта процедура реализована для численного решения на ЭВМ в виде программы на языке ФОРТРАН-IV. Если $\tilde{\tau}_r = \text{const} \neq 0$, задача сведена к системе трех линейных дифференциальных уравнений первого порядка и дается программа численного решения задачи на основе метода Кутты-Мерсона. Отклонение расчетных значений от экспериментальных данных не превышает 11%.

В теоретической части третьей главы, исходя из предположения, что в установившемся режиме течения сила веса уравновешивается касательными напряжениями на стенке канала и на свободной поверхности жидкости, т.е.

$$\rho g \delta = \lambda \rho_{cm} V^2 \delta + \lambda_r \rho_r V_r^2 \delta, \text{ получены выражения для}$$

вычисления максимальной толщины жидкости в канале δ_{max} ,

$$\delta_{max} = \Delta^2 \rho^2 / (32E), \text{ где } \Delta \text{ определяется из уравнения}$$

$$\Delta^9 = 5,51 \lambda b^5 Q^2 [\ln(\Delta + \sqrt{1 + \Delta^2}) + \Delta \sqrt{1 + \Delta^2}] + 0,306 \lambda_r b^2 \rho_r \left(\frac{Q_r}{\rho H} \right)^2 \Delta^7,$$

площади смоченной поверхности

$$F = \frac{H_{PH}}{cm \cdot 2b} [\ln(\Delta + \sqrt{1 + \Delta^2}) + \Delta \sqrt{1 + \Delta^2}],$$

площади поверхности теплообмена $F_M = \Delta H_{PM} / b$, отношения площадей поверхностей теплообмена и теплообмена:

$$\alpha_{MT} = 2 \Delta / (R \eta_i - \eta + R \Delta), \text{ где}$$

$$\eta_i = \ln(\Delta_i + \sqrt{1 + \Delta_i^2}) + \Delta_i \sqrt{1 + \Delta_i^2}, \quad \Delta_i = \sqrt{2 b E},$$

$$\eta = \ln(\Delta + \sqrt{1 + \Delta^2}) + \Delta \sqrt{1 + \Delta^2}, \text{ а также проведен численный}$$

анализ указанных соотношений. Расчет выполнен в предположении, что профиль свободной поверхности жидкости - прямая, а профиль продольного гофрированных листов насадки является параболическим. Методика расчета применима и к листам любой другой конфигурации.

В экспериментальной части третьей главы описано оборудование, программа и метод исследований, проведенных на ЭН (Табл. I). Установлены существенные отличия течения по плоским листам с РШ в сравнении с течением по гладкой поверхности, заключающиеся в следующем: для значений $K = 8-14$ на листе сразу формируется тонкое и периодическое волновое течение, практически отсутствует начальный участок, критические значения числа Рейнольдса принимают наименьшие значения ($Re^* \approx 600$); изменение K в сторону уменьшения от значения 8 приводит к увеличению средней толщины пленки, значений Re^* ; изменение K в сторону увеличения от значения 14 приводит к уменьшению средней толщины пленки, увеличению значений Re^* , соответствующих одинаковым расходам жидкости. При достаточно больших значениях K практически имеем ситуацию, свойственную для течения пленки по гладкому листу. Критические значения числа Рейнольдса в зависимости от параметра K определяются выражением

$$Re^* = 1650 - 335,7 K^{0,664} \cdot \exp(-0,039 K) \quad (1)$$

для $K = 2,25-33,25$ со средней погрешностью 12,1%, средняя толщина пленки может быть вычислена для ламинарного режима по формуле

$$\bar{\delta}_\lambda = 1,375 \cdot 10^5 \sqrt[3]{\frac{\lambda}{4q}} Re^{0,165} K^{-0,591} \cdot \exp(1,44 \cdot 10^{-2} K) \quad (2)$$

со средней погрешностью 13,7%, для турбулентного режима

$$\bar{\delta}_T = 1,028 \cdot 10^4 \sqrt[3]{\frac{\lambda}{4q}} Re^{0,514} K^{-0,327} \cdot \exp(3,3 \cdot 10^{-3} K) \quad (3)$$

со средней погрешностью 6,7% до значения $Re = 2500$.

Сравнение листа с прерывистой шероховатостью и синусоидальной, но имеющих одинаковые параметры РШ, показало, что на первом достигается, при прочих равных условиях, большее утолщение пленки, более ранняя ее турбулизация (Рис. I). В дальнейшем этот вид РШ формировался и на гофрированных листах.

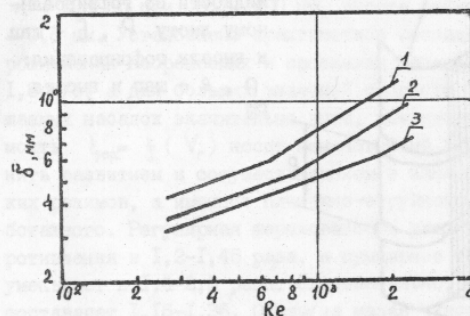


Рис. I. К выбору оптимального листа: I - лист с прерывистой шероховатостью; 2 - лист с синусоидальной шероховатостью; 3 - лист плоский, гладкий

Газовый поток, как показали опыты в режиме противотока, оказывает незначительное влияние на среднюю толщину пленки в пределах рабочих нагрузок ($V_r = 2,5 - 5$ м/с; $q = 10 - 25$ м³/м²ч) вплоть до начала захлебывания.

Установлено также, что течение жидкости по гофрированным вдоль него листам является не фронтально-пленочным, а струйно-пленочным с четким чередованием смоченных и сухих участков (Рис. 2), показано, что гофрирование приводит только к перераспределению жидкости на листе, утолщению пленки на листах, где она имеется, а введение РШ приводит к возрастанию средней толщины пленки и уменьшению Re^* в целом идентичное введению РШ на плоском листе (Рис. 3). В случае гофрированного листа с РШ, даже при максимально достигнутых значениях $Re = 3000$, меньше половины поверхности листа участвует в процессе массообмена. Максимальная толщина пленки может быть вычислена для ламинарного режима течения по гофрированному листу с РШ по формуле

$$\bar{\delta}_{max, \lambda} = 1,98 \cdot 10^5 \sqrt[3]{\frac{\lambda}{4q}} Re^{0,404} K^{-0,591} \cdot \exp(1,44 \cdot 10^{-2} K) \left(\frac{P}{2E}\right)^{0,549} \cdot (\cos \alpha)^{-0,649} \quad (4)$$

со средней погрешностью 4,7 % для $P / 2E = 1,32-1,84$, $\alpha = 0^\circ - 30^\circ$ (угол наклона ПШ к горизонтали); для турбулентного режима

$$\delta_{\max, T} = 1,782 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{3V^2}{4g}} Re^{0,698} K^{-0,327} \exp(0,33 \cdot 10^{-2} K) \left(\frac{P}{2E}\right)^{0,602} (\cos \alpha)^{-0,219} \quad (5)$$

со средней погрешностью 4,5 % до значения $Re = 2600$.

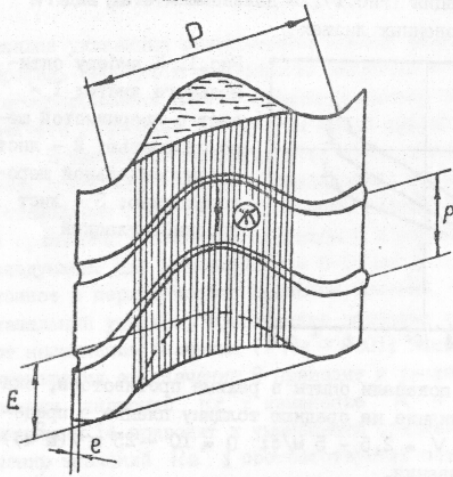


Рис. 2. Схема течения жидкости по гофрированному листу. P, E - шаг и высота гофрирования; p, e - шаг и высота ПШ

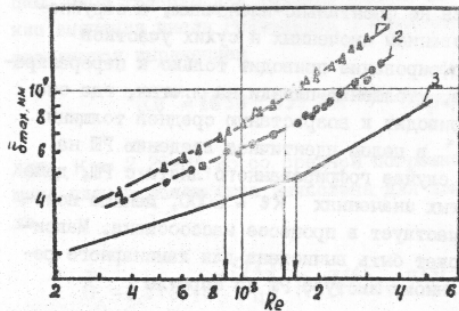


Рис. 3. Максимальная толщина пленки для: 1 - гофрированного листа с ПШ; 2 - гладкого гофрированного; 3 - плоского гладкого

В четвертой главе изучено влияние гофрирования и регулярной шероховатости на протекание процессов ТМО в условиях испарительного охлаждения воды при противоточном и поперечноточном течении фаз

на пакетах сложнопрофилированных ПН, диапазоны характеристик элементов которых были выбраны на основании результатов аналитических и экспериментальных исследований, изложенных в главах 2 и 3 работы. Расчет совместно протекающих процессов ТМО проводился на основе метода энтальпийного потенциала Меркеля (Дорошенко А.В., Липа А.И. Испарительное охлаждение воды в аппаратах с плотными насадочными слоями // Хол. техника. - 1984. - № 3. - С. 24-28).

Для рабочих характеристик ПН в условиях противотока жидкости и газа исследование проведено в диапазоне изменения $d_3 = 3-30$ мм, $\kappa = 8,3-50$ при $H_{PH} = 400$ мм, высоте ребер шероховатости $e = 0,8$ мм. Установлено практическое совпадение коэффициентов сопротивления неорошаемых и орошаемых насадок до значений $V_r = 1,5-1,8$ м/с, а для больших значений скорости газа сопротивление орошаемых насадок значительно выше, чем неорошаемых, причем, зависимость $\xi_{op} = f(V_r)$ носит немонотонный характер, что можно объяснить развитием и сосуществованием в каналах трех гидродинамических режимов, а именно: пленочно-струйного, газокапельного и барботажного. Регулярная шероховатость увеличивает коэффициент сопротивления в 1,2-1,45 раза, а суммарное термическое сопротивление уменьшает в 1,4-2,0 раза. Следовательно, эффект интенсификации составляет 1,16-1,36. Отмечена малая чувствительность термического сопротивления газа к введению ПШ. Относительный эффект интенсификации $A = (Sh / Sh) / (\xi / \xi)$ в рабочем диапазоне V_r меняется в пределах 1,0-1,35, причем наибольшие значения принимает для $\kappa = 10-14$ (Рис.4), что практически совпадает с областью наименьших значений Re^* , которая была установлена ранее. Это свидетельствует об опережающем росте интенсивности процесса по сравнению с ростом энергозатрат на его организацию. Для интервала значений $d_3 = 3-30$ мм подтверждено существование оптимального промежутка 17-22 мм.

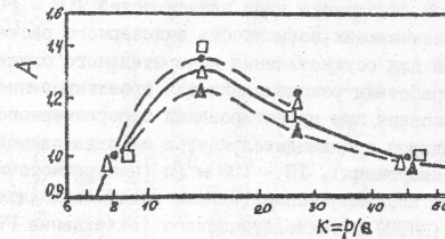


Рис. 4. Зависимость $A = f(K)$ для $Q = 11,4$ м³/м²ч, V_r , м/с: ● - 2; Δ - 3; ▲ - 4; □ - 5

Для рабочих характеристик РН в условиях поперечного тока фаз исследование проведено в диапазоне значений $d_3 = 20,7-22,8$ мм при $K = 10; 14, P = 10, 14$ мм, $K = 2,86-4,7; p = 10, 14$ мм. Установлено снижение уровня ΔP по сравнению с противотоком и возможность соответствующего повышения нагрузок. Явление захлебывания здесь отсутствует вплоть до значений $V_r = 10-12$ м/с, что подтверждает возможность расчета соотношения поверхностей тепло- и теплообмена без учета влияния газового потока. Увеличение скорости газа, расхода жидкости повышает интенсивность процесса ТМО, но при равных условиях по этим параметрам интенсифицирует процесс и введение РШ, причем существеннее - наклоненная к горизонтали. Процесс на РН из таких листов обладает и более высокой относительной интенсивностью. Коэффициенты сопротивления как неорошаемых, так и орошаемых плоскопараллельных насадок и гофрированной с РШ существенно различны, а именно: если при $Re_r > 2000$ для случая плоскопараллельной насадки продолжается убывание ξ , то для гофрированных - остается практически постоянным во всем диапазоне (до $Re_r = 8000$).

Противоточная схема взаимодействия контактирующих потоков более эффективна с термодинамической точки зрения, чем поперечноточная, обеспечивает плотность теплового потока до 370 кВт/м² при $\Delta p \approx 300$ Па. Поперечноточная схема обеспечивает плотность теплового потока лишь до 250 кВт/м² при $\Delta p \approx 200$ Па, но обладает рядом достоинств, в частности, допускает значительное расширение диапазона рабочих нагрузок, снижение энергозатрат при достигаемой более высокой степени охлаждения жидкости, дает возможность снизить общую высоту аппарата. Окончательный выбор схемы обусловлен особенностями эксплуатации, требованиями компактности и допустимым уровнем энергозатрат.

Экспериментальные данные для условий против- и поперечноточного контактирования фаз обобщены в виде зависимостей $\Delta P = f(V_r, \rho)$, $Sh = Sh(Re_r, Re_k)$, обеспечивающих возможность инженерного расчета пленочных ТМО аппаратов для осуществления испарительного охлаждения воды (Табл. 2), выработаны рекомендации для проектирования.

Результаты использованы при проектировании типоразмерного ряда вентиляторных градирен производительностью по охлаждаемой воде $10 - 200$ м³/ч (противоточных), $10 - 100$ м³/ч (поперечноточных), а также поперечноточных косвенно-испарительных воздухоохлаждателей для целей комфортного (БКВ) и технологического (охлаждения РЭА) кондиционирования воздуха. Аппараты прошли опытно-промышленную апробацию.

Таблица 1

Тип листа	Геометрические характеристики элементов насадок				Исследуемый вопрос
	Основное обозначение	Основной гофри	Регулярная шероховатость	ρ	
Плоский гладкий	ЭН1	-	-	-	фон
с РШ стандартного профиля	ЭН2	-	-	10	1,0
с прерывистой РШ	ЭН3-1 - ЭН3-7	-	-	2,5 - 36,5	1,0
Прямой риф	ЭН4	10	2,6	-	-
Прямой двойной риф	ЭН5-1 - ЭН5-6	9,6; 10,0	2,6-6,5	10	10,0; 12,5

13

Таблица 2

№ РН	Эмпирические зависимости для исследованных насадок											
	$\Delta P = C_1 V_r^k \rho$	C_2	$Sh = C_2 Re_r^m Re_k^n$	Re_r	Re_k	V_r , м/с	V_r , м/с	$Q_{ж}$, м ³ /м ² ч	Примечание			
3	3,79	2,47	0,3	0,277	1,42	0,44	5,7	2183 - 3548		24 - 108	1,4 - 5,6	10 - 35
8	3,24	2,39	0,3	0,615	1,33	0,43	7,5	2465 - 4515	26 - 157	1,3 - 6,4	10 - 35	
9	3,36	2,14	0,3	0,093	1,40	0,63	9,8	3412 - 8876	87 - 352	1,1 - 6,0	10 - 35	
II	5,53	1,89	0	0,0024	0,75	0,47	-	3030 - 7600	74 - 176	1,0 - 8,0	4 - 30	поперечный ток
IV	6,36	1,91	0	0,0195	0,72	0,20	-	3080 - 8060	41 - 194	1,0 - 8,0	4 - 30	ток

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Регулярно-волновой режим течения пленки жидкости по вертикальной поверхности с РШ представляет собой суперпозицию прогрессивных и стоячих волн, отличающихся по фазе от частоты гофрирования. Наибольшее из возможных значений будет иметь амплитуда стоячей волны, когда квадрат частоты (ω_i) будет равен ρ_i ($\omega_i^2 = \rho_i$, резонансный режим течения). В резонансном режиме волнообразование будет наиболее развито, а значит, достигнута наибольшая эффективность теплообмена в пленочном аппарате.

2. Приведенный алгоритм решения нелинейного дифференциального уравнения 3-го порядка и реализующая его программа на языке ФОРТРАН-IV дают отклонения расчетных значений средней толщины пленки жидкости от экспериментальных не более чем на 11 %.

3. Для ламинарного и турбулентного режимов течения по плоскому листу с РШ средняя толщина пленки вычисляется по формулам (2), (3), по гофрированному листу с РШ максимальная толщина пленки - (4), (5), а критические значения числа Рейнольдса - по формуле (1).

4. Экспериментально установлено, что для значений параметра шероховатости $\kappa = 8-14$ существует стабильный регулярно-волновой режим течения (модель стоячих волн), практически отсутствует начальный участок формирования волн, брызгообразование минимально, т.е. имеются оптимальные условия проявления РШ, обеспечивающие максимальную интенсификацию процессов переноса в жидкой пленке. От значений $\kappa = 8$ и $\kappa = 14$ соответственно в сторону уменьшения и увеличения параметра κ происходит ламинаризация течения, растут значения Re^* , увеличивается входной участок.

5. Формирование шероховатой поверхности следует осуществлять по типу листа "выступ", ибо на них может быть достигнуто максимальное утолщение пленки, более ранняя ее турбулизация.

6. Для продольного гофрированного вдоль течения листа характерно не пленочное, а струйно-пленочное течение, жидкость "скатывается" в ложбины гофров и течет по ним. До значений $Re = 3000$ меньше половины поверхности листа покрыто жидкостной пленкой, т.е. участвует в массообмене.

7. Гофрирование листа не изменяет режим течения (критические значения Re совпадают для гладкого и продольного гофрированного вдоль течения гладкого листа), а регулярная шероховатость приводит к возрастанию максимальной толщины пленки и снижению критического значения числа Рейнольдса.

8. Полученные выводы относительно оптимальных значений параметра шероховатости κ подтверждены на опытном материале по тепломассопереносу в условиях противо- и поперечноточного контактирования жидкости и газа.

9. Получены корреляционные соотношения, обеспечивающие возможность инженерного расчета и проектирования ТМО аппаратов для нужд холодильной техники (вентиляторных градирен, косвенно-испарительных охладителей). На основании расчетов выполнены опытные образцы аппаратов, рабочие характеристики которых соответствуют результатам расчетов. Материалы работы переданы заинтересованным организациям для использования в инженерной практике.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Кириллов В.Х., Логачевский В.И. Волновое течение тонкого слоя вязкой жидкости по наклонной плоскости // Холодильная техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1982. - № 35. - С. 117-122.
2. Кириллов В.Х., Логачевский В.И. Течение тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной гофрированной поверхности в условиях контакта с газовым потоком // Холодильная техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1985. - № 40. - С. 28-32.
3. Кириллов В.Х., Логачевский В.И. Течение тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной гофрированной поверхности в условиях взаимодействия с газовым потоком // Холодильная техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1985. - № 41. - С. 76-80.
4. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Дорошенко А.В. К расчету пленочных теплообменных аппаратов для холодильной техники // Холодильная техника. - 1985. - № 8. - С. 32-34.
5. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Дорошенко А.В. Устойчивость течения тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной поверхности в контакте с газовым потоком / Тезисы докладов конференции "Метод функций А.М.Ляпунова в современной математике". - Харьков, 1986. - С. 126.
6. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Гайдай В.Г. Вопросы гидродинамики и проектирования пленочных теплообменных аппаратов для холодильной техники / Тезисы докладов конференции "Интенсификация производства и применения искусственного холода". - Ленинград, 1986. - С. 14-15.
7. Кириллов В.Х., Логачевский В.И. Теплообмен в пленке жидкости, текущей по стенке с регулярной шероховатостью в контакте с газовым потоком // Холодильная техника и технология: Респ. межвед.

науч.-техн. сб. - 1987. - № 44. - С. 73-77.

8. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Тихоненко Л.Я. К теории течения тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной поверхности с конечной высотой выступов регулярной шероховатости / Тезисы докладов конференции "Дифференциальные и интегральные уравнения и их приложения". - Одесса, ч. I, 1987. - С. II5-II6.
9. Кириллов В.Х., Дорошенко А.В., Логачевский В.И. Определение параметров струи жидкости в поперечноточных теплообменных аппаратах с продольно гофрированными поверхностями // Холодильная техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1986. - № 45. - С. 60-63.
10. Исследование высокоэффективных насадочных структур теплообменных аппаратов / А.В.Дорошенко, В.И.Логачевский, В.В.Вистяк, Т.В.Титаренко / Тезисы докладов конференции "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса". - М., 1987. - С.53.

Условные обозначения

$\bar{\delta}_m$ - толщина пленки по Нуссельту, м; $\kappa = \rho/e$, $K = P/E$ - параметр ПШ, гофрирования; $\bar{\delta}$ - средняя толщина пленки жидкости, м; $Re_{пл}$ - пленочное число Рейнольдса; Re , Re_r - число Рейнольдса жидкости, газа; ν , ν_r - кинематический коэффициент вязкости жидкости, газа, m^2/c ; V_x , V_x - проекции скорости жидкости на оси z , x ; t - время, с; ρ , ρ_r - плотность жидкости, газа, kg/m^3 ; g - ускорение свободного падения, m^2/c ; $\chi = f(x)$, $\chi = h(x, t)$ - уравнение сечения подложки, поверхности жидкости; μ - коэффициент вязкости, Hc/m^2 ; τ_r - касательное напряжение на границе жидкость-газ, $kg/(m \cdot c^2)$; P_j , P_r - давление в жидкости, давление газа на поверхность жидкости, H/m^2 ; σ - коэффициент поверхностного натяжения, H/m ; ω_i - частота вынужденных колебаний пленки; P_1 - частота собственных колебаний стоячих волн; V , V_r - средняя по расходу скорость жидкости, газа, м/с; S - площадь поперечного сечения струи, m^2 ; $P_{см}$ - смоченный периметр канала, м; P_m - периметр сечения поверхности струи, м; λ , λ_r - коэффициенты трения на границах поверхность-жидкость, газ-жидкость; Q , Q_r - расход жидкости, газа, m^3/c ; $F_{см}$, F_m - площадь смоченной поверхности ТМО, m^2 ; H_{PH} - высота PH, м; $b = 8E/\rho^2$, $1/m$; d_3 - эквивалентный диаметр, м; ξ - коэффициент сопротивления PH; Sh - число Шр-вуда; H - расстояние между листами PH, м.

XV 1249
 ІНСТІТУТ ХОЛОДУ
 ОНАХТ
 бібліотека