

Авторефер  
В53

проф. Гушану ИВ

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

ВИСТЯК Владимир Борисович

УДК 621.565

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ПОПЕРЕЧНОТОЧНОЙ АППАРАТУРЫ  
ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

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

XV 945

Институт холода  
ОНАХТ  
бібліотека

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  
ЖАДАН В.З.  
доктор технических наук, профессор  
КАНЕВЕЦ Г.Е.

Ведущая организация - указана в решении специализированного совета

Защита диссертации состоится 25 сентября 1988 г. в  
14 часов на заседании специализированного совета К.068.27.01  
при Одесском технологическом институте холодильной промышлен-  
ности по адресу: 270057, г.Одесса, ул. Петра Великого, 1/3,  
ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИХП.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1988 года

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
к.т.н., доцент

Р.К.Никульшин

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Решениями XXVII съезда КПСС определен кру-  
той поворот к интенсификации производства, повышению качества и  
эффективности. Это возможно только на основе разработки и примене-  
ния современных ресурсо- и энергосберегающих технологий, внедрения  
высокоэффективного оборудования. Совершенствование технологическо-  
го оборудования должно идти по пути улучшения его энергетических и  
массогабаритных характеристик и снижения стоимости.

Применительно к контактным аппаратам для испарительного охла-  
ждения жидкостей и газов, широко используемым в различных отрас-  
лях промышленности, оптимальным решением этих проблем является ин-  
тенсификация процессов тепломассопереноса при минимальном росте  
энергозатрат, что возможно при создании эффективных поверхностей  
обмена. Имеющиеся в этой области исследования часто противоречивы,  
а предлагаемые в них методы интенсификации не всегда технологичны  
или эффективны, причем информация о поперечноточных АРН практиче-  
ски отсутствует. Поэтому создание контактной аппаратуры на базе но-  
вых эффективных поверхностей обмена и исследование закономерностей  
протекания процессов переноса на них является актуальной задачей.

Работа выполнялась в соответствии с программой по решению на-  
учно-технических проблем Госстроя СССР (проблема 0.55.04.02) на  
период 1981-1985 и 1986-1990 гг., утвержденной Госпланом СССР, Гос-  
строем СССР и ГКНТ СССР, и Общегосударственной программой исследо-  
ваний и использования Мирового океана в интересах науки и народно-  
го хозяйства (проблема 0.74.01.08) на период 1986-1990 гг., утвер-  
жденной Госпланом СССР и ГКНТ СССР.

Целью работы является: создание контактной поперечноточной  
аппаратуры на базе разработанных новых насадочных элементов с ре-  
гулярной шероховатостью поверхности; исследование особенностей те-  
чения жидкости по разработанным насадочным элементам и оптимизация  
их геометрических параметров; изучение гидродинамики и тепломассо-  
обмена при испарительном охлаждении газов и жидкостей в регулярных  
насадках в широком диапазоне рабочих нагрузок и совершенствование  
метода анализа процессов тепломассопереноса при поперечноточном  
контактировании.

Научные положения, защищаемые в работе:

I. Гидродинамические особенности взаимодействия потоков при  
поперечноточном контактировании в условиях гофрированных насадоч-  
ных структур определяют существование величины плотности слоя,

интерес  
назначение  
в перекрест  
ОТ  
скорости

03-554

превышение которой приводит к потере устойчивости газо-жидкостной системы и снижению интенсивности процесса теплообмена при росте энергозатрат.

2. В условиях поперечного тока организация струйно-пленочного режима течения жидкости позволяет повысить эффективность процесса теплообмена при значительном росте рабочих нагрузок по газу и жидкости.

Научные результаты, полученные в работе:

1. Разработаны насадки, обеспечивающие в условиях поперечного контактирования высокую устойчивость двухфазной системы во всем диапазоне рабочих нагрузок, характерном для компактных АРН.

2. Установлено, что аэродинамическое сопротивление разработанных РН при значениях  $d_2 > 18-20$  мм определяется главным образом ориентацией в пространстве и геометрическими параметрами гофрировки насадочных элементов; влияние РН незначительно.

3. Зафиксирован диапазон относительного шага гофрировки  $\lambda$  ( $K = 1,4-2,0$ ), в котором эффективность процесса испарительного охлаждения достигает максимальных значений.

4. Определены оптимальные геометрические параметры РН ( $k = 8-16$  мм,  $\alpha = 15^\circ$ ), обеспечивающие максимальную интенсификацию процесса теплообмена  $A = 2,4$  при поперечном контактировании взаимодействующих потоков в условиях гофрированной РН.

5. Определена область значений эквивалентного диаметра каналов РН, в которой максимально достигаемая интенсивность процесса теплообмена при поперечном контактировании постоянна.

6. Установлено соотношение поверхностей массо- и теплообмена, определяемое струйно-пленочным течением жидкости, характерным для гофрированных элементов регулярных насадок.

7. Получены аналитические и эмпирические зависимости, позволяющие рассчитывать основные характеристики течения жидкости в каналах гофрированных насадочных структур.

Научная новизна. Разработан и исследован новый тип поверхности обмена для поперечных АРН, обеспечивающий в условиях регулярных насадочных структур многократный относительный эффект интенсификации процессов переноса при испарительном охлаждении газов и жидкостей. Установлено, что гофрировка  $\lambda$  организует струйно-пленочное течение жидкости, позволяющее повысить эффективность процесса теплообмена. Показано, что для элементов типа "двойной риф" существует величина плотности слоя, превышение которой приводит к ухудшению кинетических и гидродинамических характеристик РН.

Практическая ценность. Разработанные РН "двойной риф" и полученные результаты были использованы при проектировании типоразмерного ряда поперечных вентиляторных градирен, производительностью до 530 кВт, и испарителя щелевого типа для малых холодильных машин, а также при создании испарительной ступени предварительного охлаждения воздуха и воздушного конденсатора для холодильных установок типа УВ-Ю-ЮИ и энергетических систем, работающих на низкотемпературных рабочих телах. Применение рекомендуемых поверхностей обмена позволило улучшить массогабаритные характеристики этих аппаратов на 20-40 %.

Результаты работы использованы ПО "Одесхолодмаш" (г.Одесса), ЭНИН им. Г.М.Кржижановского (г.Москва) и другими организациями.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 10 научно-технических конференциях, семинарах и совещаниях: Всесоюзная научно-техническая конференция "Проблемы использования вторичных энергоресурсов химических предприятий для получения холода, тепла и электроэнергии". - Л.: 1979; II Всесоюзное научно-техническое совещание "Проблемы совершенствования и развития оборудования для кондиционирования воздуха и вентиляции". - Харьков: 1979; Всесоюзная конференция "Гидрогазодинамика, тепло- и массообмен в энергетических установках". - Минск. 1983; Всесоюзный семинар по холодильной технике и технологии. - Калининград: 1983; VIII Всесоюзная научно-техническая конференция "Современное состояние и перспективы развития кондиционирования воздуха на судах". - Николаев: 1984; Всесоюзная научно-техническая конференция "Пути повышения выпуска и сохранения качества пищевых продуктов; внедрение безотходных и малоотходных технологий на основе использования искусственного холода". - Тбилиси: 1984; XXIV, XXVI научно-технические конференции молодых ученых и специалистов научно-исследовательского энергетического института им. Г.М.Кржижановского. - М.: 1984, 1986; VII Всесоюзная конференция "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах". - Л.: 1985.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ и получено 6 авторских свидетельств СССР на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и приложений. Содержит 102 машинописных страницы основного текста, 66 рисунков и 7 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Специфические условия работы тепло- и массообменных аппаратов холодильных установок и систем кондиционирования обусловлены малыми температурными напорами между средами, что приводит к возрастанию теплопередающей поверхности, массы и объема аппаратов. Наиболее правильным решением проблемы снижения массогабаритных и энергетических показателей аппаратов является повышение интенсивности процессов переноса.

В настоящее время большое внимание уделяется созданию контактных аппаратов со сложнопрофилированными регулярными насадками, позволяющими проводить процессы испарительного охлаждения газов и жидкостей при высокой степени их эффективности.

За рубежом широкое применение получили поперечноточные контактные аппараты, насадочная часть которых выполнена из гофрированных элементов с различными видами РШ. Это обусловлено их малой энергоемкостью, а также рядом конструктивных и эксплуатационных преимуществ. Наряду с распространенностью АРН этого типа, исследования, посвященные особенностям протекания процессов переноса на поверхностях обмена с РШ в условиях поперечноточного контактирования, носят очень ограниченный и противоречивый характер.

Недостаток информации об оптимальности геометрических параметров основной гофрировки насадочных элементов, проявлении РШ в условиях поперечного тока, влиянии плотности слоя РН на интенсивность процессов переноса определил необходимость решения следующих задач: разработку насадочной поверхности с РШ, обеспечивающей в условиях поперечноточного контактирования надежное взаимодействие материальных потоков; изучение особенностей течения жидкости по разработанным насадочным элементам и оптимизацию геометрических параметров РШ; исследование гидродинамических и кинетических характеристик РН, набранных из разработанных ЭН, получение корреляционных зависимостей, необходимых для инженерной практики.

## Исследование течения жидкости по элементам РН

Экспериментальные исследования выполнены совместно с ИНХП АН СССР с привлечением разработанного там лабораторного оборудования методом электропроводности, обеспечивающим возможность определения локальной и средней толщины пленки жидкости  $\delta_{ж}$  на поверхности сложной конфигурации.

Изучались особенности течения жидкости по вертикальным плоским и гофрированным ЭН с РШ. В первом случае выбирался тип и оп-

тимизировался относительный шаг РШ. Во втором - определялись характер течения жидкости в условиях гофрированной поверхности с РШ и величина смоченной поверхности, влияние параметров гофрировки и угла наклона РШ на кинематику жидкости. И в первом, и во втором случае в качестве фоновых были использованы аналогичные ЭН без РШ.

При исследовании течения пленки жидкости по плоскому листу выявлено, что введение РШ приводит к смещению  $Re_{ж}^*$  в область меньших значений, т.е. шероховатость поверхности ускоряет турбулизацию пленки. Определено также, что использование РШ в виде дискретных ребер шероховатости обеспечивает более устойчивый регулярно-волновой режим течения пленки, по сравнению с РШ в виде непрерывного синусоидального профиля. В этом случае начальный участок формирования волны вырождается, и на поверхности пленки наблюдается четко выраженная бегущая волна с шагом, равным шагу ребер шероховатости. В опытах варьировались высота ( $e = 0,6-1,2$  мм) и шаг ( $p = 2,5-40$  мм) ребер шероховатости. Установлены оптимальные параметры РШ -  $k = p/e$  и критические явления. Рис. 1 характеризует течение по плоскому листу с дискретной РШ.

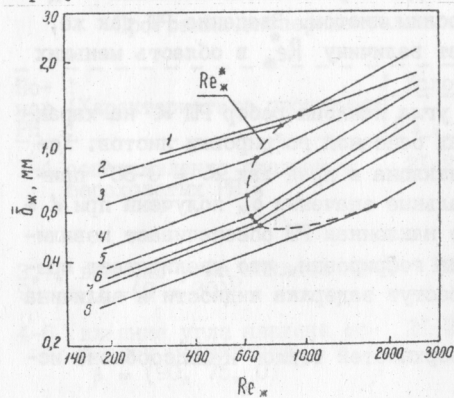


Рис. 1. Зависимость средней толщины пленки жидкости  $\delta_{ж}$  от  $Re_{ж}$  при различных  $k$ : 1 - 2,5; 2 - 4,5; 3 - 6,5; 4 - 8,5; 5 - 10,0; 6 - 20,0; 7 - 36,5; 8 -  $\infty$

На гладком листе и листах с  $k > 20$  наблюдается слабо выраженное нерегулярное волновое течение; длина начального участка уменьшается со снижением  $k$ , пленка утолщается. Минимальное значение  $Re_{ж}^*$  соответствует  $k = 8-16$ . Дальнейшее снижение приводит к росту  $Re_{ж}^*$ . Это объясняется тем, что при достаточно малых  $k$  ребра шероховатости практически смыкаются и условия течения пленки приближаются к характерному для гладкого листа. Происходит утолщение пленки, связанное с возрастанием влияния капиллярных сил - пленка скользит над гребнями ребер шероховатости.

Опытный материал обобщен экспериментальными зависимостями ( $k = 2,5-36,5$ ):

$$\bar{\delta}_{\text{лам}} = 0,83 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{3\nu/4g} \cdot Re_{\text{ж}}^{0,251} \cdot k^{-0,655} \cdot \exp(0,022k) \pm 9\% \quad (1)$$

$$\bar{\delta}_{\text{турб}} = 0,81 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3\nu/4g} \cdot Re_{\text{ж}}^{0,56} \cdot k^{-0,401} \cdot \exp(0,01k) \pm 4\% \quad (2)$$

$$Re_{\text{ж}}^* = -3,36 \cdot 10^3 \cdot k^{0,661} \cdot \exp(-0,039k) + 1650 \pm 12\% \quad (3)$$

Характер проявления РШ при течении жидкости по вертикальному гофрированному ЭН, на поверхности которого расположены ребра шероховатости, в целом соответствует картине, наблюдавшейся для плоского листа ( $k_{\text{пл}} = 8-16$ ). Важное отличие состоит в расчленении пленки на отдельные струи, стекающие по впадинам гофров. При обтекании ребер шероховатости сечение струй плавно увеличивается и вновь сужается после прохождения ребра. Поверхность листа расчленена на смоченные и сухие участки (струйно-пленочное течение жидкости).

Гофрировка поверхности приводит к уменьшению значения  $Re_{\text{ж}}^*$  ( $Re_{\text{ж}}^* = 1000$ ) по сравнению с плоским листом. Введение РШ так же, как и на плоских листах, смещает величину  $Re_{\text{ж}}^*$  в область меньших значений ( $Re_{\text{ж}}^* = 550-600$ ).

Исследовано также влияние угла наклона ребер РШ  $\alpha$  на характер течения жидкости во впадинах основной гофрировки листов. Установлено, что изменение угла наклона в пределах  $\alpha = 0-30^\circ$  приводит к увеличению  $\bar{\delta}_{\text{ж}}$ . Максимальные значения  $\bar{\delta}_{\text{ж}}$  получены при  $\alpha = 15^\circ$ . Это объясняется тем, что наклонная РШ обеспечивает извилистое течение струи внутри канала гофрировки, что увеличивает время нахождения струи в канале, растут задержка жидкости и величина смоченной поверхности ЭН.

Для оценки соотношения поверхностей тепло- и массообмена использован комплекс  $\alpha = F_m / F$ .

Величина  $\alpha$  получена расчетным путем из экспериментально найденных значений  $\bar{\delta}_{\text{ж}}$ . В среднем соотношение поверхностей в диапазоне рабочих нагрузок, характерном для АРН, составляет  $\alpha = 0,4$ . Рост шага гофрировки в пределах  $P = 10-14$  мм ( $E = \text{const}$ ) приводит к увеличению  $\bar{\delta}_{\text{ж}}$  и  $F_m$ .

#### Исследование рабочих характеристик РН

По результатам работ, выполненных на насадочных элементах, автором разработаны РН "двойной риф" (рис.2). Программа экспери-

ментальных исследований и геометрические характеристики РН приведены в табл. I.

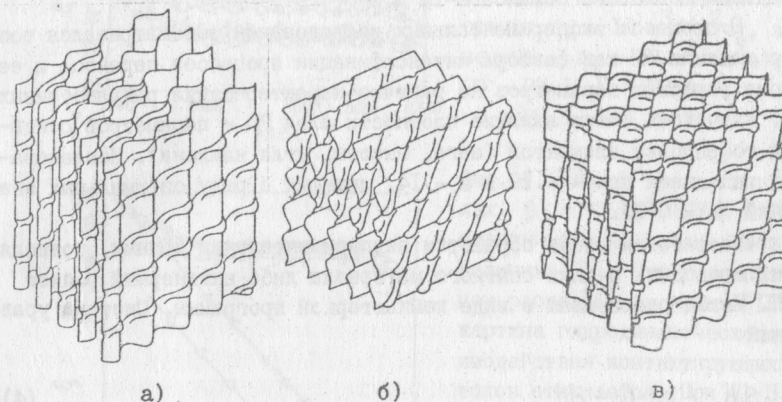


Рис. 2. Пакеты РН "двойной риф": а) по а.с. СССР № I30I470; б), в) по а.с. СССР № II79078

Таблица I  
Программа экспериментальных исследований

Но- мер РН	Характеристика программы	Условия сопоставления				Тип эле- ментов
		$d_3$ , мм	$P$ , мм	$E$ , мм	$\alpha$ , °	
I-4	сопоставление гладких и шероховатых РН	2I-22	10; 14	4	-	I, 2 - оди- нарногоф- рированные листы
3,7 9	влияние угла наклона РШ $\alpha = (0-30)^\circ$	22	14	4	-	"двойной риф"
4-6	влияние угла наклона ос- новной гофрировки, $\beta = (90, 75, 0)^\circ$	2I-22	10	4	-	"двойной риф"
8-15	влияние геометрических параметров гофрировки $E = 2-4$ $E = 3-6$	2I 22	10 14	-	15 15	"двойной риф"
9, 16-19	влияние плотности слоя $d_3 = 12-29$	-	14	4	15	"двойной риф"

Исследования проводились на лабораторном стенде, обеспечивавшем широкий диапазон нагрузок: скорость газового потока  $W_r = 0,5-$

-12 м/с, плотность орошения  $q_{ж} = 2-40 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ . Результаты получены для испарительного охлаждения в системе вода-воздух. Точность сведения теплового баланса 8-12 %.

В процессе экспериментальных исследований рассматривался вопрос влияния РШ как фактора интенсификации процессов переноса и ее геометрических параметров на рабочие характеристики разработанных РН. Изучалось также влияние плотности слоя РН и параметров основной гофрировки элементов (шага, высоты, угла наклона). Исследования выполнены при  $k = 10$  и  $k = 14$ , лежащих в ряду оптимальных значений  $k = 8-16$ .

Разработан метод обработки экспериментальных данных, позволяющий проводить анализ опытного материала либо инженерный расчет АРН. Метод реализован в виде компьютерной программы. Система уравнений

$$G_r \cdot dh_r = c_{ж} \cdot G_{ж} \cdot dt_{ж} \quad (4)$$

$$E_{ж} = 1/N_z \sum_{n=0}^{\infty} [1 - \exp(-\lambda \cdot N_z)] \sum_{k=0}^n (\lambda \cdot N_z)^k \cdot 1/k! [1 - \exp(-N_z) \sum_{k=0}^n N_z^k/k!] \quad (5)$$

$$E_{ж} = dt_{ж} / (t_{ж} - t_m) \quad (6)$$

$$\lambda = G_r [(h_r'' - h_r) - c_{ж} \cdot t_m (x_r'' - x_r)] / c_{ж} \cdot G_{ж} \cdot (t_{ж} - t_m) \quad (7)$$

$$h_r'' = f(t_{ж}), \quad x_r'' = f(t_{ж}) \quad (8)$$

решалась интервально-итерационным методом при замене дифференциалов конечными разностями при граничных условиях первого рода.

Гидродинамические исследования показали, что при  $d_3 > 20$  мм, воздействие РШ на аэродинамическое сопротивление РН по сравнению с параметрами основной гофрировки оказывается невелико. Высота ребер шероховатости становится значительно меньше ширины искривленного канала, по которому движется газовый поток.

В исследованном диапазоне рабочих нагрузок для всех типов элементов РН, при вертикальном расположении основной гофрировки не обнаружено существенного влияния  $q_{ж}$  на коэффициент сопротивления  $\xi$ . Переход между режимами течения выражен слабо, при  $Re_r > 2000$  течение автомодельно (рис.3). Явление захлебывания, характерное для противоточного контактирования, в условиях поперечного тока отсутствует.

Результаты исследований влияния пространственной ориентации основной гофрировки в объеме насадочного слоя представлены на

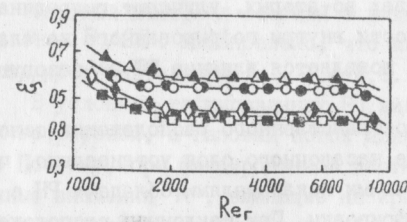


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления  $\xi$  от числа  $Re_r$ . Светлые значки соответствуют  $q_{ж} = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ , зачерненные -  $q_{ж} = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ :  
□ - РН 1; ◇ - РН 3;  
○ - РН 9; △ - РН 7

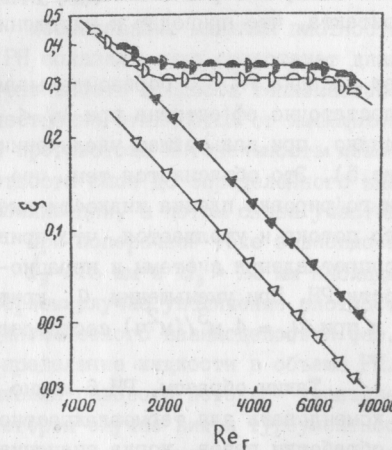


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления  $\xi$  от числа  $Re_r$ . Светлые значки соответствуют неорошаемой РН, зачерненные -  $q_{ж} = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ : □ - РН 4;  
◇ - РН 5; ▽ - РН 6

рис. 4. Наклон канала в пределах  $\beta = 75-90^\circ$  (РН 5 и РН 4) практически не сказывается на величине  $\xi$ . При горизонтальном расположении канала (РН 6) картина гидродинамического взаимодействия контактирующих потоков отличается. При  $W_r > 3$  м/с происходит трансформация поперечной схемы в прямоточную, увеличивается влияние  $q_{ж}$  на сопротивление РН.

При исследовании кинетических характеристик РН установлено, что применение РШ приводит к существенной интенсификации процесса теплообмена: для РН 3 в среднем в 1,35 раза, РН 7 - в 2 раза, РН 9 - 3 раза. Относительный эффект интенсификации соответственно составляет  $A = 1,3$  (РН 3),  $A = 1,45$  (РН 7) и  $A = 2,4$  (РН 9). Во всем диапазоне рабочих нагрузок зависимости  $K_n = f(W_r, q_{ж})$  носят линейный характер, что соответствует незначительному гидродинамическому взаимодействию фаз.

Выявлен оптимальный угол наклона РШ к горизонтали, который составляет  $\alpha = 10 - 20^\circ$ . Из исследованных насадок максимальный рост интенсивности получен для поверхности "двойной риф" с  $\alpha = 15^\circ$  (РН 9).

При изменении угла наклона РШ эффект интенсификации обусловлен тремя составляющими: во-первых, ребра шероховатости интенсифи-

кация процесса теплообмена: для РН 3 в среднем в 1,35 раза, РН 7 - в 2 раза, РН 9 - 3 раза. Относительный эффект интенсификации соответственно составляет  $A = 1,3$  (РН 3),  $A = 1,45$  (РН 7) и  $A = 2,4$  (РН 9). Во всем диапазоне рабочих нагрузок зависимости  $K_n = f(W_r, q_{ж})$  носят линейный характер, что соответствует незначительному гидродинамическому взаимодействию фаз.

цируют массообмен в жидкой фазе; во-вторых, улучшают гидродинамическую картину течения жидкости внутри гофрированного канала; в-третьих, при увеличении  $d$  появляется влияние РШ на газовую фазу.

В результате изучения пространственного расположения основной гофрировки листов в объеме насадочного слоя установлено, что для поперечноточных АРН наилучшими показателями обладают РН с вертикальным расположением гофрировки. При наклонном расположении (РН 5) появляются неорошаемые зоны, которые несколько уменьшают эффективную поверхность контакта, что приводит к ухудшению рабочих характеристик РН.

Особый интерес представляет насадка РН 6 с горизонтальным расположением гофрировки. Она достаточно эффективна при  $W_r < 3,5$  м/с и  $q_{ж} = 9$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч). Однако, при дальнейшем увеличении  $W_r$  эффективность снижается (рис. 5). Это объясняется тем, что при горизонтальном расположении гофрировки пленка жидкости смещается по ходу движения газового потока и утолщается, что приводит к увеличению термического сопротивления системы и нерациональному использованию поверхности РН. При уменьшении  $q_{ж}$  критическое значение  $W_r$  возрастает и при  $q_{ж} = 4$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч) составляет 4,5-5,0 м/с.

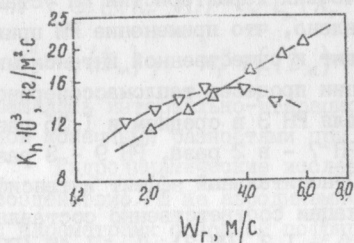


Рис. 5. К выбору пространственного расположения основного канала в насадочном слое;  $q_{ж} = 9$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч);  $\nabla$  - РН 6;  $\Delta$  - РН-13

Таким образом, РН 6 можно рекомендовать для термовлажной обработки газов, когда значения  $q_{ж}$  минимальны, а скорость газа не превышает 5 м/с. Для испарительного охлаждения жидкостей необходимо использовать РН с вертикальным расположением основного канала.

При анализе влияния параметров гофрировки ЭН, кинетика процесса переноса была рассмотрена с учетом реальных энергозатрат на его осуществление, т.к. все РН имеют различные аэродинамические

характеристики. Для этого использован комплекс

$$E^* = (1/N_z)[\Delta P + (H G_{ж} \cdot g \cdot g)/G_r] \quad (9)$$

Опытный материал обобщен в виде зависимостей  $E^* = f(K)$ , где  $K = P/2E$ . Установлено, что максимальное значение интенсивности достигается при  $K = 1,4-2,0$ .

В условиях гофрированных РН жидкость дислоцируется во впадинах гофрировки, а газовый поток движется по криволинейному каналу. Поэтому, при фиксированной плотности насадочного слоя, определенные значения  $K$ , влияющие на криволинейность линий тока газа, могут обеспечить приближение либо удаление его от поверхности контакта фаз.

Исследование влияния плотности слоя на рабочие характеристики РН показало, что существует диапазон  $d_3 = 15-22$  мм, в котором интенсивность процесса тепломассопереноса постоянна. Результаты качественно отличаются от имеющихся данных по противотоку фаз. При противотоке интенсивность монотонно снижается с уменьшением плотности слоя до определенного значения, затем наступает участок стабилизации, а потом снова участок монотонного снижения.

При поперечном токе зависимости  $N_z = f(d_3)$  имеют иной вид. При  $d_3 < 15$  мм и  $d_3 > 22$  мм наблюдается монотонное снижение  $N_z$ . В первом случае увеличение плотности слоя приводит к усилению гидродинамического взаимодействия фаз. Происходит нежелательное перераспределение жидкости в объеме РН. Жидкость смещается по ходу движения газового потока - уменьшается поверхность массопереноса. Во втором случае вихри турбулентности потока газа не достигают мест дислокации жидкости во впадинах гофрированной поверхности.

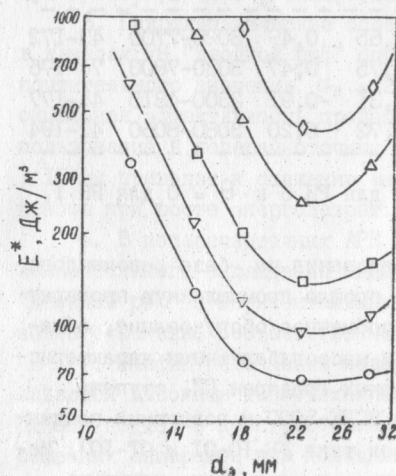


Рис. 6. Влияние плотности слоя РН;  $q_{ж} = 14$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч);  $E_{ж}$ :  $\circ$  - 0,4;  $\nabla$  - 0,45;  $\square$  - 0,5;  $\Delta$  - 0,6;  $\diamond$  - 0,7

Выполненный анализ с учетом энергозатрат на организацию процесса переноса (рис. 6) позволяет определить оптимальный диапазон значений  $d_3 = 21-26$  мм.

Таким образом, при проектировании поперечноточных контактных аппаратов предпочтительно использовать РН с  $d_3 = 21-26$  мм. Применение РН с  $d_3 < 15$  мм в условиях поперечного тока нецелесообразно, т.к. это приводит к росту энергозатрат при снижении интенсивности процесса тепломассопереноса.

Для всех РН получены эмпирические зависимости вида:

$$\Delta P = c_1 \cdot W_r^p \cdot q_{ж}^\theta \quad (I0)$$

$$Sh = c_2 \cdot Re_r^n \cdot Re_{ж}^m \quad (II)$$

При обработке экспериментальных данных использовалась разработанная программа оптимизации, реализованная на ЭВМ.

Гидродинамические и кинетические характеристики для рекомендуемых РН приведены в таблице 2. Для пересчета на другие температурные условия для всех РН получена единая зависимость

$$Sh'/Sh = (35/t_{ж,1}')^{0,4} \quad (I2)$$

Таблица 2

Значения параметров в зависимостях (II) и (I2), = 10 %

N	$\Delta P = c_1 \cdot W_r^p \cdot q_{ж}^\theta$ *)			$Sh = c_2 \cdot Re_r^n \cdot Re_{ж}^m$			$Re_r$	$Re_{ж}$
	$c_1$	$p$	$W_r, м/с$	$c_2$	$n$	$m$		
1	5,15	1,88	1,0-8,0	0,00394	0,65	0,49	3020-7700	43-172
3	5,53	1,89	1,0-8,0	0,00236	0,75	0,47	3030-7800	74-176
6	2,18	1,01	1,0-5,3	1,16490	0,31	-0,91	2300-4815	44-177
9	6,36	1,91	1,0-8,0	0,01949	0,72	0,20	3080-8060	41-194

\*) при  $q_{ж} = 4-30$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч)  $\theta = 0,16$  для РН 6 и  $\theta = 0$  для РН 1, РН 3, РН 9

В результате выполненного исследования на базе рекомендуемых РН "двойной риф" разработано и прошло промышленную проверку различное поперечноточное тепломассообменное оборудование, обладающее улучшенными энергетическими и массогабаритными характеристиками (типоразмерный ряд вентиляторных градирен ПП, ступень предварительного охлаждения воздуха ИСВК-5000 и воздушный конденсатор для малых холодильных установок типа УВ-10-01 и ОТ-10). Использование РН "двойной риф" позволило, в частности, улучшить

массогабаритные характеристики конденсатора на 20 %. Применение ее в ИСВК-5000 и градирнях серии ПП позволяет эксплуатировать аппараты без сепаратора капельной влаги, что существенно улучшает их энергетические показатели.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В регулярных насадках, состоящих из гофрированных элементов наблюдается струйно-плочное течение жидкостей, обеспечивающее высокую устойчивость двухфазной системы во всем диапазоне рабочих нагрузок.

2. Полученные зависимости для расчета максимальной толщины струи жидкости в каналах ЭИ позволяют определить величину реальной поверхности массообмена в разработанных РН. При рабочих нагрузках, характерных для компактных АРН она составляет 35-40 % конструктивной поверхности насадки.

3. Применение РН, набранной из элементов "двойной риф" с относительным шагом гофрировки  $K = 1,7$ , оптимизированными геометрическими параметрами РН ( $k = 14$ ,  $\alpha = 15^\circ$ ) обеспечивает возрастание интенсивности тепломассопереноса в 3 раза при росте энергозатрат в 1,25 раза. Относительный эффект интенсификации составляет  $A = 2,4$  раза.

4. Механизм интенсификации процесса переноса в РН "двойной риф" состоит в воздействии РН и геометрии гофрировки на жидкостную и газовую фазы соответственно.

5. Гидродинамические особенности течения двухфазных потоков в каналах РН "двойной риф" определяют существование области предпочтительного значения  $d_3 = 21-26$  мм, в которой достигается максимальная эффективность процесса испарительного охлаждения. Использование в поперечноточных АРН гофрированных насадок с  $d_3 < 15$  мм приводит к снижению интенсивности процесса тепломассопереноса при росте энергозатрат.

6. В поперечноточных АРН термовлажностной обработки газов и испарительного охлаждения жидкостей следует использовать РН "двойной риф" с горизонтальным и вертикальным расположением основного канала, соответственно.

7. Унифицированность поверхности обмена "двойной риф", обладающей высокими теплотехническими показателями, обеспечивает единый подход в конструкторских решениях при создании тепломассообменных аппаратов для холодильной техники и систем кондиционирования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В РАБОТАХ:

1. Эффективность работы холодильной машины с испарительной ступенью воздушного конденсатора / А.В.Дорошенко, В.В.Вистяк, Г.С.Антоненко, С.У.Кивензор // Холодильная техника. - 1984. - № 3. - С. 19-22.

2. Вистяк В.В. Тепломассообменные поперечноточные аппараты с регулярными насадками для испарительного охлаждения газов и жидкостей / Гос. н.-и. энерг. ин-т. - М.: 1984. - 14 с.: ил. - Библиогр.: 5 назв. - Деп. в информэнерго 26.II.84, № 1661.

3. Вистяк В.В. Интенсификация процесса тепломассопереноса в воздушном конденсаторе холодильной машины // Тез. докл. VIII Всесоюзной науч.-техн. конф.: Современное состояние и перспективы развития кондиционирования воздуха на судах. - Николаев: 1984. - С. 38-41.

4. Вистяк В.В., Гегин А.В. Новые представления о пути развития поперечноточных насадочных структур тепломассообменных аппаратов // Тез. докл. УП Всесоюзной конф.: Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах. - Л.: 1985. - Т. 3. - С. 250-252.

5. Интенсификация конвективного теплообмена в воздушных конденсаторах трубчато-пластинчатого типа / В.В.Вистяк, А.В.Дорошенко, Г.С.Антоненко, С.У.Кивензор // Холодильная техника. - 1986. - № 10. - С. 25-28.

6. Вистяк В.В., Гегин А.В. Анализ процессов переноса при испарительном охлаждении жидкостей и газов в регулярных насадочных слоях / Гос. н.-и. энерг. ин-т. - М.: 1986. - 12 с.: ил. - Библиогр. 8 назв. - Деп. в Информэнерго 26.01.87, № 2410.

7. Вистяк В.В., Дорошенко А.В., Гайдай В.Г. Интенсификация тепломассообмена в поперечноточных контактных аппаратах // Холодильная техника. - 1987. - № 4. - С. 34-38.

8. А.с. 1179078 СССР, МКИ<sup>3</sup> F 28 В 1/06. Воздушный конденсатор / Г.С.Антоненко, А.В.Дорошенко, В.В.Вистяк и др.; Спец. конструктор.-технолог. бюро компрес. и холод. машиностроения. - № 3594363/24-06; Заявл. 23.05.83; Оpubл. 15.09.85, Бюл. № 34. - 2 с.

9. А.с. 1263274 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 01 Д 3/28. Тепломассообменный аппарат / Г.С.Антоненко, В.В.Вистяк, А.В.Дорошенко, С.У.Кивензор; Одесск. технолог. ин-т холод. пром-сти и ПО "Одесхолодмаш". - № 3878711/31-26; Заявл. 04.01.85; Оpubл. 15.10.86, Бюл. № 38. - 3 с.

10. А.с. 1301470 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 01 Д 53/20. Насадка для тепломассообменного аппарата / В.В.Вистяк, А.В.Дорошенко, Л.П.Холпанов, Ю.И.Демьяненко; Одесск. технолог. ин-т холод. пром-сти. - № 3879770/31-26; Заявл. 07.01.85; Оpubл. 07.04.87, Бюл. № 13. - 2 с.

11. А.с. 1305516 СССР, МКИ<sup>3</sup> F 28 Д 5/00. Воздушно-испарительный конденсатор / Г.С.Антоненко, А.В.Дорошенко, В.В.Вистяк и др. Одесск. технолог. ин-т холод. пром-сти. - № 3965128/24-06; Заявл. 22.07.85; Оpubл. 23.04.87, Бюл. № 15. - 2 с.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

АН - аппараты с регулярными насадками; РН - регулярная насадка; ЭН - насадочный элемент; РШ - регулярная шероховатость;  $d_3$  - эквивалентный диаметр каналов;  $k$  - относительный шаг ребер шероховатости;  $p, e$  - шаг и высота ребер шероховатости;  $K$  - относительный шаг гофрировки;  $P, E$  - шаг и высота гофрировки;  $E$  - эффективность охлаждения;  $E^*$  - удельный расход энергии;  $F$  - поверхность;  $W$  - скорость;  $G$  - массовый расход;  $q$  - плотность орошения;  $\Delta P$  - гидравлическое сопротивление;  $N$  - число единиц переноса;  $H$  - высота насадки;  $\rho$  - плотность;  $c$  - теплоемкость;  $h$  - энгальпия;  $X$  - влагосодержание;  $t$  - температура;  $\xi$  - коэффициент гидравлического сопротивления;  $K$  - коэффициент передачи суммарного тепла;  $\nu$  - кинематическая вязкость;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\delta$  - толщина;  $\alpha$  - угол наклона ребер шероховатости к горизонтали;  $\beta$  - угол наклона гофрировки к горизонтали;  $\lambda$  - характеристическое число;

$$A = (Sh_{ш}/Sh_{гн}) / (\xi_{ш}/\xi_{гн}); \quad Sh = k_h \cdot d_3 / D \cdot \rho \cdot g_r$$

## ИНДЕКСЫ

лам. - ламинарный; турб. - турбулентный; опт. - оптимальный; ж - жидкость; г - газ; м - мокрый; ш - шероховатый; гл. - гладкий; h - отнесенный к разности энгальпий;  $\Sigma$  - суммарный; " - насыщенный; \* - критический

