

Автор ерр.
790

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
У С С Р
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА

ПУЧКОВ Борис Васильевич

"ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ
ФРЕОНОВ-12 и 22 И ИХ СМЕСЕЙ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ
ОРЕБРЕННЫХ ТРУБАХ"

Диссертация написана на русском языке
(05.04.03 - Гидравлические машины, механизмы и аппараты
холодильной и криогенной техники)

Пересчет 1987

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук.

Одесса - 1973

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
У С С Р

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

ПУЧКОВ Борис Васильевич

"ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ
ФРЕОНОВ-12 и 22 в их СМЕСИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ
ОРЕБЕРЕННЫХ ТРУБАХ"

Диссертация написана на русском языке
(05.04.03 – Гидравлические машины, машины и аппараты
холодильной и криогенной техники)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук.

Одесский технологический
институт пищевой промыш-
ленности им. М. В. Ломоносова
БИБЛИОТЕКА

✓ 012181

ОНАХТ 09.07.12
Исследование тепло-

Одесса – 1973



v012181

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор В.Ф. Чайковский,
кандидат технических наук, доцент Р.А. Бехтеев.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Г.Н. Данилов,
кандидат технических наук, старший преподаватель С.М. Суриш

Ведущее предприятие -- указано в решении Ученого Совета
института

Автореферат рассмотрен "21" августа 1973 г.

Защита состоится "21" сентября 1973 г.

на заседании Ученого Совета механического факультета

Одесского технологического института пищевой промышленности
им. М.В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИП
им. М.В. Ломоносова.

Отзывы в двух экземплярах просим направлять по адресу:

270039, г. Одесса-ГСП, ул. Свердлова, 112.

Ученый Секретарь Совета факультета

В.Т.Н.

/Запорожец Л.А./

ВВЕДЕНИЕ

В директивах девятого пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 гг. наряду с другими отраслями промышленности предусматривается дальнейшее развитие холодильной техники на основе научных достижений. Большое значение придается созданию высокопроизводительных холодильных установок с улучшенными объемными и энергетическими характеристиками на базе существующего оборудования. Одним из направлений для решения поставленной задачи является изыскание и применение новых рабочих веществ, представляющих собой смеси холодильных агентов. Как показали исследования, проведенные у нас в стране и за рубежом, применение неазеотропных смесей хладагентов дает ряд преимуществ по сравнению с однокомпонентными веществами в отношении объемных, энергетических, эксплуатационных и термодинамических показателей холодильных машин. Перспективным хладагентом для бинарных установок является бинарная смесь фреонов-12 и 22.

В работах Л.Филиппа, В.Ф. Чайковского, А.П. Кузнецова, Н.И. Гудимова и др. эта смесь предложена для использования в качестве нового рабочего вещества компрессионных холодильных машин. Показано, что применение смеси Ф-12 + Ф-22 вместо фреона-12 приводит к увеличению холодопроизводительности установки или к снижению температуры кипения в испарителе и улучшает ее эксплуатационные и энергетические показатели.

Решение вопроса о практическом использовании смесей хладагентов в значительной мере зависит от величин поверхностей теплообменных аппаратов установок и возможности их расчета. Важным аппаратом таких установок является конденсатор. Процесс передачи тепла в кожухотрубном конденсаторе определяется в основном

термическим сопротивлением со стороны конденсирующегося пара, которое при конденсации бинарной смеси паров зависит от взаимного влияния совместно протекающих процессов тепло- и массообмена. Для уменьшения этого термического сопротивления конденсационные аппараты изготавливаются из оребренных труб;

Теоретические и экспериментальные данные по тепло- и массообмену при конденсации двухкомпонентных смесей на горизонтальных оребренных трубах и пучках отсутствуют. В литературе также отсутствуют расчетные рекомендации по определению необходимой поверхности конденсации для этого случая.

Содержанием данной работы является исследование тепло- и массообмена при конденсации смесей фреонов-12 и 22 на одиночных горизонтальных оребренных трубах и двадцатипятидюймовом горизонтальном пучке оребренных труб в диапазоне изменений концентраций 0-100%, тепловых нагрузок 1000-40000 Вт/м² при температурах насыщения 30, 40 и 50°C и обмене теплоты на пучке 40-125 кВт.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, перечня использованной литературы и приложений.

В первой главе дан обзор теоретических и экспериментальных работ по исследованию процесса конденсации паровых смесей на различных охлаждаемых поверхностях и определены задачи исследования.

При конденсации смеси паров у поверхности раздела фаз образуется диффузионный пограничный слой, сопротивление которого совместно с сопротивлением пленки конденсата определяет интенсивность теплоотдачи. Наличие парового пограничного слоя обуславливается разностью концентраций низкокипящего компонента в паре у поверхности конденсации и в основной массе пара.

Пар у поверхности конденсации находится в равновесии с образующейся жидкостью. Поэтому в стационарном режиме избыточное количество низкокипящего компонента отводится в направлении ядра парового потока путем диффузии и частично конвекцией. Совместно протекающие процессы переноса тепла в пленке конденсата и массообмена в паровом пограничном слое оказывают влияние друг на друга. Кроме того, согласно работам Л.Д.Бермана и др., при совместном протекании процессов тепло- и массообмена возникает поперечный поток вещества, который вызывает изменение толщины пограничного слоя и распределения в нем продольных скоростей потока и температур. Сложность явления предопределила то, что процесс тепло- и массообмена при конденсации бинарных смесей исследован недостаточно.

Теоретическое решение А.Колборна и Т.Дрю, основанное на упрощенной "пленочной" теории переноса, дает значительное расхождение с экспериментом (А.Д.Двойрис и О.А.Бенъяминович): При больших поперечных потоках массы это расхождение достигает 300-400%. Расчетная модель, предложенная в работе Е.М.Спарроу и Е.Маршалла применима только для двумерной вертикальной поверхности.

В работе Г.Ф.Смирнова и Р.А.Доманского приведена аналитическая модель расчета процесса конденсации двухкомпонентной бинарной смеси на горизонтальной гладкой трубе. Решение одномерной задачи в цилиндрических координатах основано на уравнении стационарной конвективной диффузии. Сравнение результатов решения с опытными данными по конденсации смеси ф-12 + ф-22 показало удовлетворительное согласование. Максимальное расхождение опытных и расчетных данных (до 20%) наблюдалось в области малых тепловых нагрузок.

Экспериментальному исследованию тепло- и массообмена при конденсации бинарных смесей посвящено относительно небольшое количество работ. В работах В. Уоллеса и А. Дэвисона, В. Мирковича и Р. Митена получены частные эмпирические зависимости для коэффициента теплоотдачи в пленке конденсата, которые строго применимы только для конкретных условий опыта. Результаты исследований А. Д. Двойрса, О. А. Беняминавича, Л. С. Боба, С. Н. Семехватова и др. получены для гладких труб и представлены в виде критериальных уравнений для коэффициента теплоотдачи. Однако для проверки применимости этих уравнений при конденсации смесей на горизонтальных оребренных трубах необходимо проведение отдельных исследований.

Исходя из проведенного анализа состояния вопроса определены следующие задачи исследования:

- 1) аналитический расчет процесса тепло- и массообмена при конденсации бинарной неазеотропной смеси на горизонтальной оребренной трубе с различной геометрией оребрения;
- 2) экспериментальное исследование тепло- и массообмена при конденсации смесей фреонов-12 и 22 на одиночных горизонтальных оребренных трубах и многорядном пучке горизонтальных оребренных труб;
- 3) обобщение теоретических и экспериментальных данных для коэффициента теплоотдачи и условного коэффициента теплоотдачи при конденсации бинарных смесей на одиночных горизонтальных оребренных трубах;
- 4) экспериментальное изучение закономерностей распределения условных коэффициентов теплоотдачи в пучке оребренных труб;

5) составление инженерной методики расчета необходимой поверхности тепло- и массообмена многотрубных конденсаторов.

Во второй главе приведен аналитический расчет тепло- и массообмена при конденсации бинарной взаиморастворимой смеси на горизонтальной оребренной трубе двух типов оребрения. (Геометрические размеры ребер приведены в таблице I). В первом случае выбирались параметры серийных оребренных труб с трапециевидными ребрами (трубка № 1), выпускаемых Одесским заводом холодильного машиностроения. Во втором — параметры оребрения были близки к оптимальным в соответствии с работой И. И. Луканова (трубка № 3, кольцевые ребра постоянной толщины).

Таблица I

№ трубы	d_n , мм	d_o , мм	d_{en} , мм	S , мм	β , мм	α , мм
1	20,5	17,76	12,5	2,01	0,74	0,44
2	21,2	17,01	12,5	2,04	0,58	0,19
3	24,0	18,0	16,0	2,5	1,0	1,5

Математическое описание процесса конденсации бинарной смеси на горизонтальной оребренной трубе связано со значительными трудностями. Это определяется тем, что конденсация паров на такой трубе одновременно происходит на участках горизонтальной гладкой трубы, заключенных между ребрами, торцевых поверхностях ребер, а также на вертикальных боковых поверхностях ребер.

Как показано в работе Р. А. Доманского, толщина диффузионного пограничного слоя, образующегося возле горизонтальной гладкой трубы, достигает 3-4 мм, что соизмеримо с высотой

ребер для труб, применяемых в холодильной технике. Поэтому влияние деформации диффузионного пограничного слоя в межреберном пространстве на тепломассоперенос не учитывалось.

Это позволило для численного решения применить физическую модель процесса тепло- и массообмена при конденсации на горизонтальной гладкой трубе, приведенную в работе Р.А. Доманского. Рассматривалась стационарная одномерная задача в цилиндрических координатах при следующих допущениях:

- 1) подвод пара равномерен по длине и периметру трубы;
- 2) конвективный перенос тепла от пара к пленке конденсата мал и им можно пренебречь;
- 3) пар на границе раздела фаз равновесен с образующейся жидкостью, т.е. на границе раздела отсутствует перепад температур;
- 4) эффект термодиффузии незначителен;
- 5) скорость пара пренебрежимо мала;
- 6) влияние свободной конвекции на массоперенос пренебрежимо мало;
- 7) для пленки конденсата справедливы все допущения Нуссельта.

С учетом указанных допущений дифференциальное уравнение стационарной конвективной диффузии запишется в виде:

$$\frac{d^2 w_i}{dR^2} - \left(\frac{dw_i}{dR} \right)^2 \frac{1}{w_i} + \frac{dw_i}{dR} \cdot \frac{1}{R} \left(1 + \frac{q z_i R_{гг}}{D \rho_{см} r w_i} \right) = 0 \quad (I)$$

где $R_{гг} = \frac{R_H + R_0}{2}$ — радиус условной гладкой трубы.

Увеличение поперечного потока массы при конденсации на оребренной трубе учитывалось при определении теплового потока через пленку конденсата по уравнению:

$$q = 0.81 \left(\frac{\lambda_m^3 \rho_m^2 r g}{\mu_m D_\Sigma} \right)^{1/4} (t_0 - t_{см})^{3/4}, \quad (2)$$

приведенному в работе И.И. Луканова.

Здесь в качестве определяющего размера принят эквивалентный диаметр:

$$D_\Sigma = \left(1.3 \frac{F_{бок}}{F_P} \cdot \frac{1}{H_\Sigma^{0.25}} + \frac{F_{гор}}{F_P} \cdot \frac{1}{D_0^{0.25}} + \frac{F_{гор}}{F_P} \cdot \frac{1}{D_H^{0.25}} \right)^{-4} \quad (3)$$

где: H_Σ — высота вертикальной пластины, имеющей площадь, равную боковой поверхности ребра и эквивалентную ей по количеству передаваемого тепла.

На основании предложенной модели выполнен расчет тепловых потоков и условных коэффициентов теплоотдачи, отнесенных к полной внешней поверхности оребренной трубы для бинарной системы ф-12 + ф-22 при граничных условиях:

1) при $R = R_{гг}$ из условия непрерывности потока массы на границе раздела фаз:

$$\frac{dw_{i0}}{dR} = \frac{q(z_i - w_{i0})}{D r \rho_{см}} \quad (4)$$

2) при $R = R_{конд}$, $w = w_i = const$, т.е. на значительном удалении от поверхности конденсации концентрация компонентов в паре постоянна и равна w_i . Численное решение

уравнения (1) совместно с уравнением (2) проведено методом Рунге-Кутты на ЭЦМ "Раздан-2". Для расчета использованы данные по фазовому равновесию "пар-жидкость" (М.Крибел, В.Ф. Чайковский) исследуемой бинарной системы. Определение необходимых физических свойств смеси проводилось по зависимостям, приведенным в работе С.Бретшнайдера.

На рис.1 показаны полученные в расчете зависимости условного коэффициента теплоотдачи от температурного напора (тепловой нагрузки) для различных концентраций смеси (трубка № 1). Как видно из рисунка, все приведенные кривые проходят через максимум. Максимуму теплоотдачи предшествует область малых температурных напоров, после чего интенсивность теплоотдачи падает аналогично данным по конденсации паров чистых веществ. Полученный результат можно объяснить следующим образом. При увеличении теплового потока толщина пленки конденсата и ее термическое сопротивление возрастают. Воздействие увеличения теплового потока на паровой пограничный слой характеризуется уменьшением его термического сопротивления. Различный характер зависимости термических сопротивлений пленки и парового пограничного слоя от теплового потока определяет наличие минимального суммарного сопротивления при определенных тепловых нагрузках, что соответствует максимуму теплоотдачи.

На рис.2 показано типичное изменение термических сопротивлений пленки и пограничного слоя от теплового потока для смеси 0,860 кг/кг весового состава фреона-12 в паровой фазе (трубка № 3).

В третьей и четвертой главах приведено описание опытных установок и методики экспериментальных исследований.

Первая серия опытов проведена на экспериментальной установке по исследованию процесса конденсации на одиночных оребренных горизонтальных трубах. Корпус экспериментального одноструйного конденсатора горизонтального типа изготовлен из нержавеющей трубы диаметром 89/92 мм и длиной 560 мм. Для визуального наблюдения за процессом конденсации установлены два смотровых окна. В качестве рабочего участка выбраны оребренные медные трубы двух типов (трубка № 1 и № 3). Для отбора проб паровой и жидкой фаз в верхней и нижней частях конденсатора смонтированы специальные пробоотборники.

Экспериментальный конденсатор второй опытной установки обеспечивал исследование теплоотдачи при конденсации на двадцатирядном пучке горизонтальных оребренных труб. Схема установки приведена на рис.3. Движение рабочего вещества в установках осуществлялось за счет естественной циркуляции. Насыщенные пары фреона генерировались в испарителе с электрическим подогревом и через сепаратор и пароперегреватель поступали в опытный конденсатор. Возврат конденсата происходил самотеком по опускающему стояку в нижнюю точку испарителя.

Многорядный конденсатор изготовлен из листовой стали толщиной 25 мм и выполнен в форме параллелепипеда, размерами 680x555x260 мм. Для гашения скорости пара входная часть паропровода изготовлена в виде раструба. В трубных досках конденсатора заварено 80 оребренных труб с шагом по равнобедренному треугольнику 27 мм. Трубы образуют 20 горизонтальных рядов — по четыре последовательно соединенных трубы в каждом ряду. Оребренные трубы, из которых собирався конденсатор, изготавливаются Одесским заводом холодильного машиностроения (трубка № 2, таблица № 1).

Для измерения состава пара по высоте пучка на боковой крышке конденсатора установлено пять пробоотборников.

В обеих установках отвод тепла конденсации осуществлялся охлаждающей водой.

Температура конденсирующегося пара измерялась двумя медь-константановыми термопарами, установленными в разных точках парового пространства конденсаторов и контролировалась лабораторными термометрами с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$.

Температура стенок исследуемых одиночных труб измерялась медь-константановыми термопарами, зачеканенными в четырех сечениях по длине (две термопары в каждом сечении).

Температура стенок труб многорядного конденсатора измерялась в каждом горизонтальном ряду. В первом ряду установлено четыре медь-константановых термопары, в каждом последующем - две.

Температура охлаждающей воды измерялась на входе и выходе исследуемых одиночных труб или каждого ряда труб многотрубного конденсатора медь-константановыми термопарами и контролировалась лабораторными термометрами с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$.

Все термопары изготовлены из одних сплавов медного и константанового провода, диаметром $0,2\text{ мм}$ и имеют индивидуальную тарировку. Э.Д.С. термопар измерялась компенсационным методом высокоомным потенциометром Р-307 в комплекте с гальванометром М-17/5.

Давление конденсирующегося пара измерялось образцовым манометром МО класса $0,4$.

Тепловой поток определялся по расходу охлаждающей воды и ее подогреву. На одиночных трубах проверка теплового баланса производилась по расходу конденсата. На пучке труб тепловой баланс сводился по подводимой мощности к электронагревателям испарителя. Расхождение не превышало $\pm 8\%$.

Измерение состава смеси в паровой и жидкой фазах осуществлялось с помощью универсального лабораторного хроматографа УХ-1 с детектором по теплопроводности. Хроматограф предварительно тарировался.

Заданный тепловой режим, а также перегрев пара ($0,1-0,4^{\circ}\text{C}$) поддерживался системой автоматического регулирования. Параметры обретенных труб определялись большим инструментальным микроскопом БМИ-1.

Перед заполнением фреоном установки тщательно вакуумировалось с помощью насоса РВН-20. Фреон в установки заливался через влагоосушительный фильтр, заполненный цеолитом марки NaA-21.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования и их анализ.

Для проверки надежности работы установок и принятой методики экспериментального исследования дополнительно были проведены опыты по исследованию теплообмена при конденсации технически чистых фреонов-12 и 22. В опытах установлено, что коэффициент теплоотдачи на одиночных серебряных трубах в $1,6-1,7$ раза выше, чем на гладкой. Это может быть обусловлено увеличением доли вертикальной поверхности ребер в полной внешней поверхности трубы. Аналогичные данные были получены другими авторами (Д.Катц, С.В.Хивияков, И.И.Дуканов). Результаты опытов хорошо согласуются с зависимостью:

$$Nu_{d_3} = 0,81 (Gr Pr K)^{0,25}_{d_3}, \quad (5)$$

полученной И.И.Дукановым при обобщении большого количества опытных данных по конденсации различных веществ на одиночных

оребранных горизонтальных трубах. В отличие от теории Нуссельта не установлено расслоение экспериментальных значений коэффициентов теплоотдачи по температурам насыщения.

Характер зависимости условного коэффициента теплоотдачи для смесей фреонов-12 и 22 от температурного напора (тепловой нагрузки) при различных значениях весовой концентрации конденсирующегося пара приведен на рис.1 (трубы № 1, сплошные кривые). Аналогичные зависимости получены для трубы № 3. Из рисунка видно количественное и качественное отличие полученных частных зависимостей $\alpha_{см} = f(\Delta t)$ от подобных зависимостей для конденсации чистых веществ. В области малых температурных напоров теплоотдача определяется термическим сопротивлением диффузионного пограничного слоя. При больших тепловых потоках интенсивность теплоотдачи падает так же, как у чистых фреонов. В этой области теплоотдача определяется в основном термическим сопротивлением пленки конденсата.

В опытах со смесями, как и при конденсации чистых фреонов, экспериментальные значения условных коэффициентов теплоотдачи, отнесенные к полной внешней поверхности трубы, выше, чем на гладкой в 1,6-1,7 раза.

При конденсации смесей также не получено расслоение условных коэффициентов теплоотдачи по температурам насыщения.

Сопоставление опытных и расчетных данных (рис.1) показывает систематическое отклонение последних в области малых температурных напоров. При $\Delta t > \Delta t_{max}$ расчетные данные практически совпадают с экспериментальными. Максимальное отклонение не превышает 30-35%, что позволяет сделать вывод о применимости приведенной аналитической модели для расчета поверхности конденсации неподвижных фреоновых смесей.

Из рис.4 видно, что условный коэффициент теплоотдачи с

увеличением концентрации Ф-22 уменьшается от значения для чистого Ф-12 до минимума при 20-23%-ном весовом содержании Ф-22. Дальнейшее увеличение концентрации Ф-22 характеризуется возрастанием условного коэффициента теплоотдачи до значения, соответствующего чистому Ф-22. Такой характер зависимости $\alpha_{см} = f(w)$ можно объяснить наличием максимального термического сопротивления диффузионного пограничного слоя при данном составе смеси и постоянном тепловом потоке.

Обобщение опытных данных по массоотдаче проведено в виде критериального уравнения:

$$Nu_D \frac{Z_1 - w_{10}}{Z_1} = f(\Pi_w; Pr_D), \quad (6)$$

приведенного в работах Л.С.Егобе и С.Н.Семихатова для случая конденсации неподвижного или медленнодвижущегося пара неазеотропной бинарной смеси. Обработанные в таком виде опытные данные представлены зависимостями:

$$Nu_D \frac{Z_1 - w_{10}}{Z_1} = 2 \Pi_w^{0.25} Pr_D^{0.33}, \quad (7)$$

которая совпадает с аналогичным уравнением, полученным в работе Р.А.Доманского при исследовании процесса тепло- и массообмена при конденсации смесей Ф-12 и + Ф-22 на наружной поверхности горизонтальной гладкой трубы. В уравнении (7) в качестве определяющего размера принят эквивалентный диаметр - d_3 , рассчитанный по формуле (3).

Как видно из рис.5, максимальный разброс опытных данных относительно зависимости (7) не превышает $\pm 15\%$.

Уравнение (7) справедливо в пределах изменения критериев: $2 \leq \Pi_w \leq 100$; $0,55 \leq Pr_D \leq 0,8$ в интервале изменения концентраций фреона-12 от 0 до 100%.

Совместно с уравнением (2) и уравнением теплоотдачи со стороны охлаждающей воды зависимость (7) может использоваться для расчета необходимой поверхности тепло- и массообмена.

Анализ системы уравнений (1,2) методами теории подобия с учетом граничных условий позволил получить критериальное уравнение для условного коэффициента теплоотдачи:

$$Nu_{cm} = f(\Pi_w; Pr_D; Nu_{пл}; \frac{z_1 - w_{10}}{w_1 - w_{10}}), \quad (8)$$

которое учитывает интенсивность процессов переноса тепла и массы в паровой и жидкой фазах. Так как для инженерных расчетов удобнее пользоваться условным коэффициентом теплоотдачи, то результаты экспериментального исследования обрабатывались в таком виде и приведены на рис.6. Как видно из рисунка, характер обобщающей кривой зависит от величины комплекса $(\Pi_w Pr_D)$.

В области $22 \leq \Pi_w Pr_D \leq 55$ наступает автомодельность, что предопределяется следующим. С увеличением потока тепла толщина диффузионного пограничного слоя и его термическое сопротивление уменьшаются. При этом величина условного коэффициента теплоотдачи приближается к соответствующему значению коэффициента теплоотдачи для пленки конденсата. При $q \geq 30000 \frac{Вт}{м^2}$ толщина пограничного слоя становится минимальной и практически не зависит от роста тепловой нагрузки.

Обработка опытных данных методом наименьших квадратов выявила конкретный вид зависимости (8).

Для области $1,6 \leq \Pi_w Pr_D \leq 22$:

$$Nu_{cm} = 0,078 Nu_{пл} \frac{z_1 - w_{10}}{w_1 - w_{10}} (\Pi_w Pr_D)^{0,71} \quad (9)$$

С учетом уравнения теплоотдачи для пленки конденсата:

$$Nu_{cm} = 0,0631 \frac{z_1 - w_{10}}{w_1 - w_{10}} (Ga Pr K)_K^{0,25} (\Pi_w Pr_D)^{0,71} \quad (10)$$

Для области $22 \leq \Pi_w Pr_D \leq 55$:

$$Nu_{cm} = 0,73 Nu_{пл} \frac{z_1 - w_{10}}{w_1 - w_{10}} \quad (11)$$

В этой области концентрационный комплекс:

$$\frac{z_1 - w_{10}}{w_1 - w_{10}} = 1,18 = const.$$

Тогда, с учетом уравнения (5):

$$Nu_{cm} = 0,7 (Ga Pr K)_K^{0,25} \quad (12)$$

Наибольшее отклонение опытных данных от зависимостей (9, II) составляет $\pm 20\%$.

Опыты на одиночных оребренных трубах позволили перейти к исследованию теплоотдачи на пучке.

Результаты опытов на первом ряду труб по конденсации чистых фреонов-12 и 22 соотносились с экспериментальными данными для одиночных труб (зависимость 5). Данные по массоотдаче при конден-

сацией смесей фреонов сопоставлялись с зависимостью (7). Согласование экспериментальных результатов в обоих случаях удовлетворительное.

В опытах со смесями установлено такое же влияние рядности на теплоотдачу, как и у чистых фреонов, а также отсутствие влияния состава смеси на распределение относительных условных коэффициентов теплоотдачи по высоте пучка. Полученный результат можно объяснить следующим. Измерения показали, что температура стенок труб по рядам и состав пара в межтрубном пространстве по высоте пучка практически постоянны. Следовательно, влияние на теплоотдачу термического сопротивления диффузионного пограничного слоя по высоте пучка также остается постоянным. Повидимому, наблюдаемое в опытах изменение теплоотдачи по рядам определяется, как и при конденсации чистых фреонов воздействием конденсата, стекающего с верхних труб на нижние.

На рис. 7 показано распределение местных относительных коэффициентов теплоотдачи при конденсации фреонов-12 и 22 и их смесей по высоте пучка горизонтальных оребренных труб. Из рисунка видно, что начиная с пятого ряда уменьшение теплоотдачи незначительное, что согласуется с теорией Нуссельта. В то же время полученная зависимость проходит значительно выше. Это можно объяснить увеличением интенсивности теплоотдачи за счет турбулентности, вызываемой каплями и вслесками при прерывистом стекании конденсата с одного ряда труб на другой. На этом же рисунке приведены результаты других исследований по конденсации фреонов на пучках гладких и оребренных труб. Расхождение опытных данных у различных авторов можно отнести за счет наличия примесей в исследуемых веществах или конструктивных особенностей установок.

Зависимость средних по пучку относительных коэффициентов теплоотдачи (кривые - 1 и 2) от числа рядов приведена на рис. 8. Здесь же показаны опытные данные, полученные в работе О.П.Иванова и др. при исследовании конденсации движущегося пара фреона-12 на десятирядных пучках гладких и оребренных труб. Распределение средних относительных коэффициентов теплоотдачи также не описывается теорией Нуссельта и согласуется с опытными результатами О.П.Иванова.

Среднеквадратичное отклонение опытных данных от обобщенных кривых, приведенных на рис. 7 и 8, составляет $\pm 9\%$.

Полученные в работе обобщенные зависимости для условного коэффициента теплоотдачи при конденсации на одиночных оребренных трубах и зависимости по распределению относительных коэффициентов теплоотдачи по высоте горизонтального пучка оребренных труб могут быть использованы для расчета поверхности многорядных омываемых конденсаторов. В соответствии с результатами исследования в диссертации приведена инженерная методика расчета поверхности конденсации.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика аналитического расчета теплового потока и условного коэффициента теплоотдачи при конденсации бинарной неazeотропной смеси на горизонтальной оребренной трубе.

2. Проведено экспериментальное исследование тепло- и массообмена при конденсации фреонов-12 и 22 и их смесей на одиночных горизонтальных оребренных трубах двух типов оребрения в интервале изменения тепловых нагрузок $q = 1000-40000 \text{ Вт/м}^2$ при температурах насыщения $t_n = 30, 40 \text{ и } 50^\circ\text{C}$ и температурных напорах $\Delta t = 1-23^\circ\text{C}$. Экспериментальные результаты по конденсации чистых

фреонов хорошо согласуются с зависимостью:

$$Nu_{d_3} = 0,81 (Ga Pr K)_{d_3}^{0,25},$$

которая обобщает опытные данные других исследований.

3. Установлено, что зависимость условного коэффициента теплоотдачи от температурного напора (тепловой нагрузки) при конденсации смесей фреонов качественно и количественно отличается от аналогичной зависимости для чистых фреонов и имеет явно выраженный максимум. Это определяется соотношением термических сопротивлений диффузионного слоя и пленки конденсата.

4. Зависимость условного коэффициента теплоотдачи от концентрации смеси при постоянном тепловом потоке проходит через минимум. Минимальному значению функции $\alpha_{cm} = f(w_1)$ при $q = const$ соответствует весовая концентрация фреона-12 — 0,770 — 0,800 кг/кг, что определяется условиями фазового равновесия исследуемой смеси.

5. Установлено, что экспериментальные значения коэффициентов теплоотдачи, отнесенные к полной внешней поверхности оребренной трубы, при конденсации как чистых фреонов-12 и 22, так и их смесей, в 1,6—1,7 раза выше, чем для соответствующих гладких труб.

6. Получены обобщающие критериальные уравнения для коэффициента массоотдачи (7) и условного коэффициента теплоотдачи (10,12). В качестве определяющего размера в этих уравнениях принят эквивалентный диаметр (3).

7. В опытах со смесями при конденсации на горизонтальном многорядном пучке оребренных труб установлено такое же влияние рядности на теплоотдачу, как и у чистых фреонов, а также отсутствие влияния состава смеси на распределение относительных

условных коэффициентов теплоотдачи по высоте пучка.

8. Установлено, что распределение местных и средних по пучку относительных коэффициентов теплоотдачи по рядам труб при конденсации фреонов-12 и 22 и их смесей не описывается формулами Нуссельта и лежит значительно выше теоретической кривой. Однако характер зависимостей остается таким же. Наиболее резкое ухудшение теплоотдачи (в 1,3—1,5 раза) происходит с первого по пятый ряд труб.

9. Влияние натекания конденсата на средние коэффициенты теплоотдачи при конденсации практически неподвижного пара фреонов и их смесей на пучке с шахматным расположением труб может учитываться множителем:

$$\bar{\epsilon}_n = \bar{\alpha}_n / \alpha_1 = n^{-0,11},$$

а на пучке с коридорным расположением труб — множителем:

$$\bar{\epsilon}_n = n^{-0,14}.$$

10. Полученные в опытах зависимости позволяют оценить необходимую поверхность тепло- и массообмена многорядных конденсаторов, работающих в условиях конденсации бинарных смесей фреонов.

Условные обозначения

$d_{вн}$ — внутренний диаметр трубы;

d_0 — диаметр у основания ребра;

d_n — наружный диаметр ребра;

δ — толщина ребра у торца;

a — расстояние между ребрами у основания;

S — шаг ребра;

$F_{тор}$ — торцевая поверхность ребра;

- $F_{\text{тор}}$ - цилиндрическая поверхность трубы свободная от ребер;
 $F_{\text{бок}}$ - боковая поверхность ребра;
 F_p - поверхность оребренной трубы, длиной S ;
 R - текущий радиус;
 t - температура;
 Δt - температурный напор "пар-стенка";
 ρ - плотность;
 W - весовое содержание компонентов в паре;
 Z - весовое содержание компонентов в жидкости;
 α - коэффициент теплоотдачи;
 q - удельный тепловой поток;
 D - коэффициент молекулярной диффузии;
 β - коэффициент массоотдачи;
 r - теплота испарения;
 μ - коэффициент динамической вязкости;
 ν - коэффициент кинематической вязкости;
 λ - коэффициент теплопроводности;

И н д е к с ы

- Э - эквивалентный;
 i - высококипящий компонент;
 пл - пленка;
 ж - жидкость;
 см - смесь;
 п - пар;
 i - номер труб;
 n - количество труб в пучке по вертикали;
 к - конденсат;
 о - поверхность раздела фаз;
 ст - сетка.

К р и т е р и и

- $Nu_D = \frac{\rho d_3}{D}$ - диффузионный критерий Нуссельта;
 $Nu_{\text{см}} = \frac{\alpha_{\text{см}} d_3}{\lambda_k} = \frac{q d_3}{(t_p - t_{\text{см}}) \lambda_k}$ - условный критерий Нуссельта;
 $Nu_{\text{пл}} = \frac{\alpha_{\text{пл}} d_3}{\lambda_k} = \frac{q d_3}{(t_o - t_{\text{см}}) \lambda_k}$ - критерий Нуссельта для пленки конденсата;
 $Pr_w = \frac{q d_3}{r \mu}$ - критерий, учитывающий влияние поперечного потока масс;
 $Pr_2 = \frac{\nu}{D}$ - диффузионный критерий Прандтля;
 $(Ga Pr K)_m = \frac{g \rho_m^2 r d_3^3}{\mu_m \lambda_m \Delta t}$ - безразмерный комплекс.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. В.Ф.Чайковский, Р.А.Бахтиозин, Г.Ф.Смирнов, И.И.Дуканов, Р.А.Доманский, Б.В.Пучков, Н.С.Зайнулина. Исследование тепло- и массообмена при конденсации бинарных смесей фреонов. Труды IV Всесоюзного совещания по тепло- и массообмену. Минск, 1972.
2. В.Ф.Чайковский, Р.А.Бахтиозин, И.И.Дуканов, Б.В.Пучков. Экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи при конденсации смесей фреонов-12 и 22 на горизонтальной оребренной трубе. Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО, Выпуск 2, 1972.
3. В.Ф.Чайковский, Р.А.Бахтиозин, И.И.Дуканов, Б.В.Пучков. Исследование тепло- и массообмена при конденсации смесей фреонов-12 и 22 на горизонтальных оребренных трубах. Холодильная техника. № 2, 1973.

Результаты работы доложены автором:

1. На XXXIII научной конференции ОТИП им.М.В.Ломоносова, посвященной 50-летию образования СССР, 1972 .

ВР07581 Подписано к печати 3.08.73г. Объем 1,5 п.л.

Уч.изд.л.1,5 +1 вкл.0,1 усл.п.л. Бумага газетная №2. Тир. 200 экз. Зак. №92

Лаборатория фотомеханической печати ОТИП

имени М.В.Ломоносова, г.Одесса, ул.Свердлова, 112