

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

Аспирант ЭЛЬ-РИДИ МЕДХАТ КОТБ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА
НА ЭЛЕМЕНТАХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АППАРАТОВ
ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК
ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

(Специальность 05.04.03 – гидравлические машины,
машины и аппараты холодильной
и криогенной техники)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 1974

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

Аспирант ЭЛЬ-РИДИ МЕДХАТ КОТЪ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА
НА ЭЛЕМЕНТАХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АППАРАТОВ
ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК П. И ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

(Специальность 05.04.03--гидравлические машины, машины и аппараты холодильной и криогенной техники)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

О д е с с а - 1 9 7 4

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
холодильной промышленности.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ -

доктор технических наук, профессор ЧУМАК И.Г.
кандидат технических наук, доцент КАЛИНИН Л.Г.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ -

доктор технических наук, профессор ГОРБИС З.Р.
кандидат технических наук, доцент ЧЕРНОЗУБОВ А.М.

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ - УКРНИИЯСОМОПРОМ, г.Киев .

Автореферат разослан "19" августа 1974 г.

Защита диссертации состоится "23" сентября 1974 г.
в 15⁰⁰ часов на заседании Совета факультетов холодильной
и криогенной техники Одесского технологического института
холодильной промышленности, г.Одесса, ул.Петра Великого, 1/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах с подписью, за-
веренной печатью учреждения, просим направлять в Совет ин-
ститута по адресу: 270000, г.Одесса, ГСП, ул.Петра Великого,
1/3, ОТИХП.

Ученый секретарь Совета
факультетов, доцент Г.В.ЛИХНИЦКИЙ

Исх. № 03-676

В В Е Д Е Н И Е

Претворяя в жизнь решения XXIV съезда Коммунистической
партии, Государственный Комитет Совета Министров СССР по нау-
ке и технике провел за последние годы большую работу по опре-
делению основных направлений научно-исследовательских и
опытно-конструкторских работ в целях дальнейшего развития тех-
нического прогресса в холодильном хозяйстве страны.

Формулируя основные направления развития научно-техничес-
кого прогресса на период 1976-1990 гг., обращалось внимание
на необходимость исследования и создания комплексных холодиль-
ных агрегатов и машин с высокой степенью заводской готовности
и полной автоматизацией; интенсификацию теплообмена в аппара-
тах; создание новых типов торгового холодильного оборудования
с индивидуальным и централизованным холодоснабжением для мага-
зинов самообслуживания, в том числе для продажи товаров; раз-
работку и создание новых бытовых холодильников с температура-
ми в морозильном отделении до -12 и -18°C , были указаны и мно-
гие другие актуальные проблемы.

Как правило, для большинства торгового оборудования изгото-
авливаются охлаждающие батареи из оребренных труб, работа ко-
торых протекает в условиях положительных температур (открытие
прилавка, температура окружающего воздуха 32 и 25°C) и естест-
венной конвекции воздуха. Принудительная циркуляция воздуха
устраивается только для выравнивания температуры в охлаждаемом
объеме прилавка.

Масштабы разработок и внедрения характеризуются миллионами штук специальных установок. Поэтому важным вопросом является исследование тепло-и массообмена для охлаждаемых ребристых и гладкотрубных батарей торгового оборудования и холодильных шкафов. При этом вопросы механизма взаимовлияния массообмена на теплообмен требуют отдельного изучения с применением новых методов исследования.

Имеющиеся результаты исследований по взаимному тепло-и массопереносу для гладких труб и ребер нуждаются в экспериментальной проверке в условиях охлаждения воздуха, в обобщении результатов исследований и в описании аналитическими зависимостями.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию условий тепло-и массообмена при естественной конвекции между воздухом и элементами горизонтальных гладких и ребристых поверхностей, которые применяются в холодильной технике, аналитическому исследованию теплообмена на ребристых поверхностях, экспериментальной их проверке.

В работе для исследования тепло-и массообмена использовался оптический метод, позволяющий проводить визуальное наблюдение и получить непосредственно из интерферограмм тепловой и диффузионный пограничные слои, значение локальных коэффициентов тепло-и массопереноса.

Применение оптического метода для исследований тепло-и массопереноса позволило также определить формирование пограничного слоя у охлаждаемой поверхности, и на этой основе внести дополнительный фактор в аналитические формулы, который

учитывает влияние пограничного слоя вокруг трубы на тепло-и массообмен.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Проведены теоретические и экспериментальные исследования совместно протекающих процессов для горизонтальных гладких и ребристых труб при естественной конвекции воздуха.

Доказана правомерность применения оптического метода для определения локальных и средних значений коэффициентов теплоотдачи в явном теплообмене для гладких трубчатых поверхностей в случае совместно протекающих процессов тепло-и массообмена при естественной конвекции воздуха. При этом получено подтверждение предположения Льюиса о постоянстве соотношения коэффициентов переноса, что говорит об аналогии между процессами тепло-и массообмена при условиях, указанных в работе.

Получена аналитическая зависимость для расчетов коэффициента теплоотдачи ребристых труб в явном теплообмене, которая, с учетом теплового и диффузионного пограничных слоев, согласуется с экспериментальными данными, когда высота ребра значительно больше пограничного слоя, образующегося у трубы.

Получены зависимости для определения оптимальных геометрических характеристик ребристых элементов для батарей, работающих в условиях естественной конвекции.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

Разработана методика определения локальных и средних значений коэффициентов теплоотдачи для гладких горизонтальных труб-

чатых поверхностей охлаждения оптическим методом, когда невозможно применить метод теплового баланса.

Предложены зависимости для расчета коэффициентов теплоотдачи для гладких и оребренных батарей при совместно протекающих процессах тепло-и массообмена для условий естественной конвекции воздуха, характерных для открытого торгового оборудования. Даны рекомендации по выбору и проектированию компактных ребристых поверхностей.

А П Р О Б А Ц И Я

Результаты исследований докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции молодых специалистов по холодильной технике и технологии в Москве, отчетных научных конференциях в институте в 1973 и 1974 гг., а также принята к публикации статья в журнале "Холодильная техника".

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ литературных данных по вопросу тепло-и массообмена на цилиндрических плоских и оребренных поверхностях с парогазовой смесью позволяет сделать следующие выводы :

1. Для единичных цилиндрических и плоских поверхностей существуют математические модели процессов тепло-и массопереноса, которые позволяют перейти к критериальным зависимостям. Экспериментальные данные различных авторов хорошо совпадают для разных условий опыта.

2. Для оребренных поверхностей наиболее полно изучен процесс теплообмена плоской оребренной стенки без учета массооб-

мена. Имеющиеся зависимости позволяют рассчитывать и оптимизировать теплоотдачу этих поверхностей в простейших случаях.

3. В подавляющем большинстве работ не приведено данных об учете лучистой составляющей в общем тепловом балансе систем.

Локальный коэффициент теплообмена или массообмена наиболее просто определяется на интерферограммах в полосах, ориентированных перпендикулярно поверхности, где угол наклона температурного (концентрационного) профиля у поверхности твердого тела сразу дает градиент температуры или концентрации.

Интерферометр ИЗК-454 имеет две приемные части, что позволяет получить одновременно распределение полей концентраций и температур в совместно протекающих процессах тепло-и массообмена.

Применение оптических методов в сочетании с кино-и фотосъемкой исследования, совместно протекающих процессов тепло-и массообмена между воздухом и поверхностью, значительно расширяют возможности раскрытия физической картины явлений, т.к. позволяют визуально наблюдать формирование температурных и влажностных полей и пограничных слоев у поверхности, получить количественную и качественную картину совмещенных теплового и диффузионного пограничных слоев.

Необходимость такого исследования определяется тем, что при режимах элементов холодильных установок следует правильно учитывать влияние массообмена и лучистой составляющей теплового потока в расчетных зависимостях. Единой и обоснованной методики расчета таких элементов пока нет. В то же время вклад

лучистой составляющей может быть в некоторых случаях значительными, кроме того, его доля может изменяться для процессов фазового перехода на поверхности тепло-и массообмена (конденсация, инеобразование).

4. Оптические методы для изучения процессов тепло-и массообмена на поверхностях охлаждения почти не применялись.

Проведенный анализ литературы с данными и сделанные на его основе выводы позволяют сформулировать задачи настоящего исследования.

1/Разработать и применить методику количественного исследования теплового и диффузионного пограничных слоев для горизонтальных гладких и ребристых труб при естественной конвекции оптическим методом.

2/Оценить вклад лучистой составляющей в процессе теплообмена при фазовых переходах на поверхности охлаждения.

3/Аналитически и экспериментально изучить совместно протекающие процессы тепло-и массообмена на ребренных трубчатых поверхностях охлаждения в условиях естественной конвекции.

4/Получить зависимости для расчета коэффициентов тепло-и массоотдачи для ребренных цилиндрических поверхностей, а также определить оптимальные размеры ребристой поверхности, обеспечивающие максимальные коэффициенты тепло-и массоотдачи.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ИЗМЕРЕНИЕ,
МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Характерные размеры труб приведены в таблице I. В качестве хладоносителя применялся этиленгликоль, который охлаждался в термостате марки УТ-15 двумя холодильными установками, в ре-

Таблица I

Геометрические характеристики
рабочих участков

Труба	Длина трубы, L, мм	Диаметр трубы, d, мм	Высота ребра, h, мм	Шаг ребра, s, мм	Толщина ребра, t, мм	Число ребер на П.м.,
1 медь полированная	584	20	-	-	-	-
2 сталь нержавеющая	500	56,6	-	-	-	-
3 сталь окисленная	500	56	30	5-10-15-20- -25	1,5	300
4 алюминий	500	30	10	8,8	0,9	124
5 сталь оцинкованная	500	38	19	8,0	1,0	100
6 сталь оцинкованная	500	56	30	10,0	1,5	100

зультате чего было возможно достичь на поверхности труб температуры до 255 К. Измерение температуры воздуха, поверхности трубы, а также перепада температуры хладоносителя между входом и выходом проводилось термопарной установкой в комплекте с потенциометром Р306, гальванометром М17/4, нормальным элементом второго класса. Влажность воздуха измерялась психрометрическим методом. Расход хладоносителя через исследуемую трубу определялся объемным расходомером и регулировался таким образом, чтобы подогрев его ΔT не превышал двух градусов. Небольшой подогрев хладоносителя в трубе позволил приблизительно считать температуру ее поверхности постоянной.

Испытуемые трубы устанавливались вдоль оптических осей двух коллиматоров прибора ИАБ-45I, в горизонтальном положении по оси симметрии трубы, для фотографирования теплового и диффузионного пограничных слоев - вокруг труб.

Теневой прибор ИАБ-45I основан на методе зависимости плотности среды и коэффициента преломления от температуры и предназначен для качественного и количественного изучения распределения и изменения плотности газовых слоев вокруг моделей, исследуемых в аэродинамических трубах, камерах для продувки турбинных лопаток, барокамерах и других установках.

Оптическая система прибора позволяет вести непосредственное наблюдение теневой картины через окуляр, фотографирование на киноплёнку и на фотопластинку и проектирование изображения на экран.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА
НА ГЛАДКИХ ТРУБАХ

Методом теплового баланса получены результаты экспериментального исследования тепло-и массообмена для гладких горизонтальных труб (№ 1 и № 2) в условиях естественной конвекции при значениях Gr_{Pr} и Gr_{Sc} , изменяющихся в пределах от 10^3 до 10^6 и соответствующих ламинарному режиму.

На рис. I представлены результаты исследований для режимов явного теплообмена при наличии или отсутствии процесса массообмена. В результате обобщения данных получены формулы в следующем виде :

для теплообмена -

$$Nu = 0,58 (Gr_{Pr})^{0,25} \quad (1)$$

и для массообмена -

$$Sh = 0,59 (Gr_{Sc})^{0,25} \quad (2)$$

Погрешность экспериментов по тепло-и массообмену была в пределах 16 %. Оценка погрешности полученных результатов, проведенная методом наименьших квадратов, в случае теплообмена составляет 8,5 % и 11 % - в случае массообмена.

Экспериментальные значения коэффициентов тепло-и массоотдачи, полученные тепловым методом, сопоставлялись с оптическими и расчетными значениями по формулам Исаченко В.П.

Для примера приводим один из режимов обработки опытов с помощью интерферограммы. С их помощью можно определить распределение температуры (концентрации) по периметру трубы. Результаты распределения температур по периметру трубы на дуге $\varphi = 90^\circ$

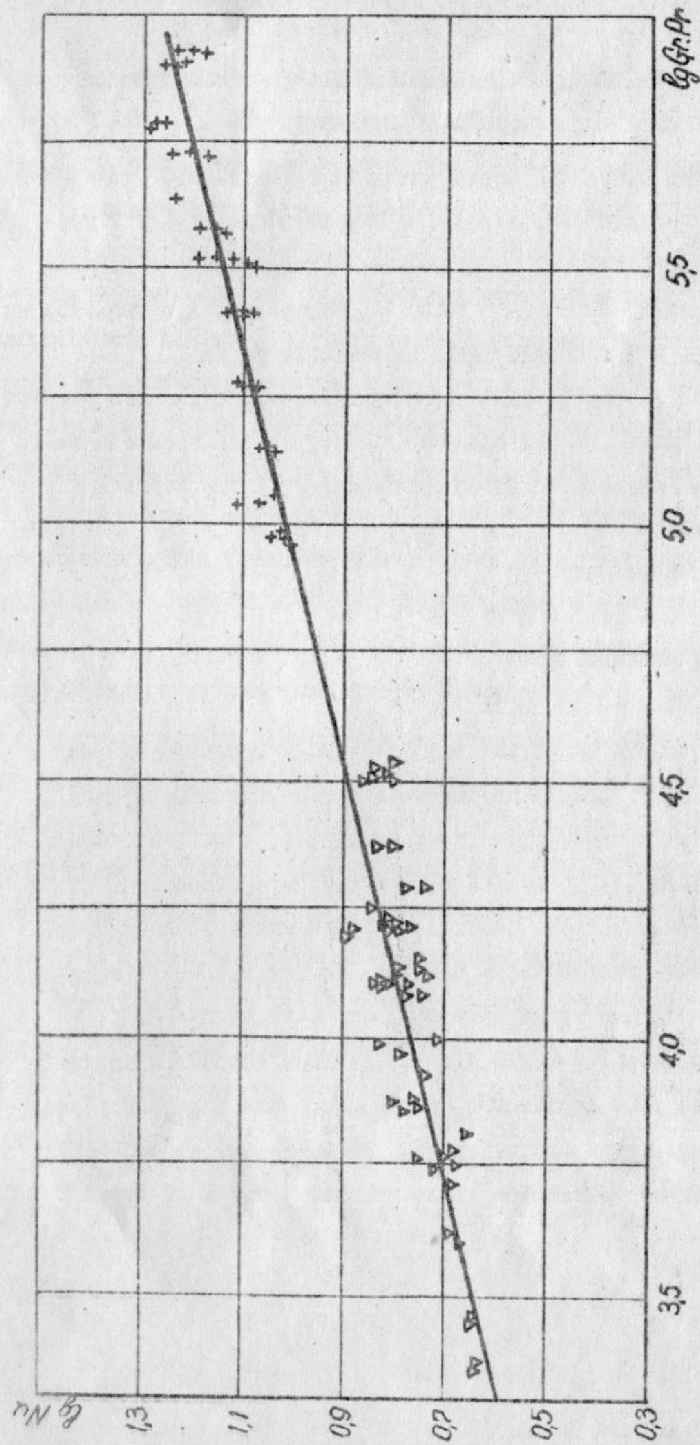


Рис.1. Экспериментальные данные по теплообмену на гладких трубах
(v - труба № 1, + - труба № 2)

представлены на рис.2. Толщина пограничного слоя в зависимости от длины дуги (угла γ°) представлена на рис.3.

Из распределения температуры (концентрации) определяются локальные коэффициенты теплоотдачи α_γ при разных углах γ , которые представлены на рис.4.

Расчеты коэффициентов теплоотдачи, проведенные с использованием интерферограмм, показали, что их значения совпадают с результатами, полученными методом теплового баланса, при этом максимальное расхождение между ними составляет около 10%. Это расхождение объясняется тем, что в верхней и нижней частях трубы тепловой пограничный слой имеет расплывчатый профиль. Поэтому точное определение значения коэффициента теплоотдачи оптическим методом затруднительно. Осреднение коэффициента теплоотдачи проводилось для тех частей поверхности, где пограничный слой представляет собой упорядоченную структуру. Проведенная интерферограмма показывает, что в пределах пограничного слоя существует сложное распределение плотности (температуры) воздуха.

Как известно, такое распределение соответствует ламинарному режиму течения. Полосы равной плотности (температуры) вызваны одновременным влиянием поля температур и поля концентраций влаги в пределах пограничного слоя, т.е. соответствуют процессу совмещенного тепло-и массообмена. Поскольку характер ламинарного движения при наличии поперечного потока массы сохранился, а теплофизические характеристики воздуха остались неизменными, что следует ожидать, то расчетная зависимость для "влажного" теплообмена должна соответствовать известному соот-

$$\frac{t-t_0}{t_{\text{нов}}-t_0} = \theta$$

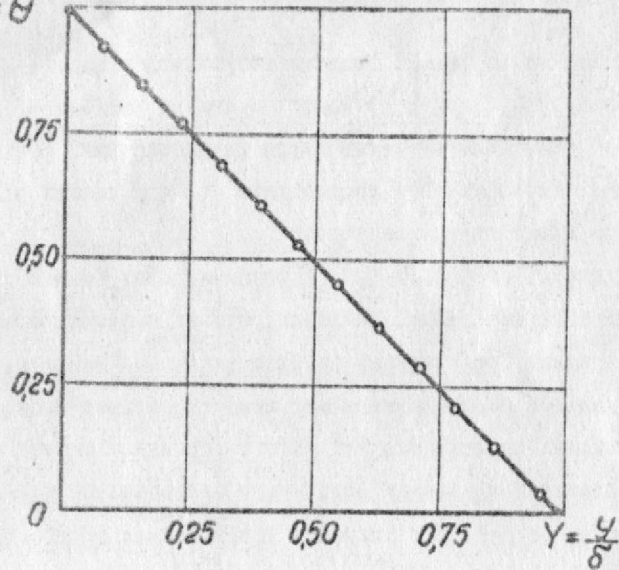


Рис.2. Зависимость безразмерной температуры от безразмерной толщины пограничного слоя при $\gamma = 90^\circ$.

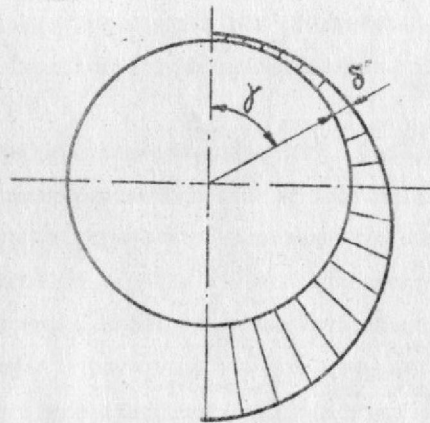


Рис.3. Распределение толщины пограничного слоя на гладкой трубе.

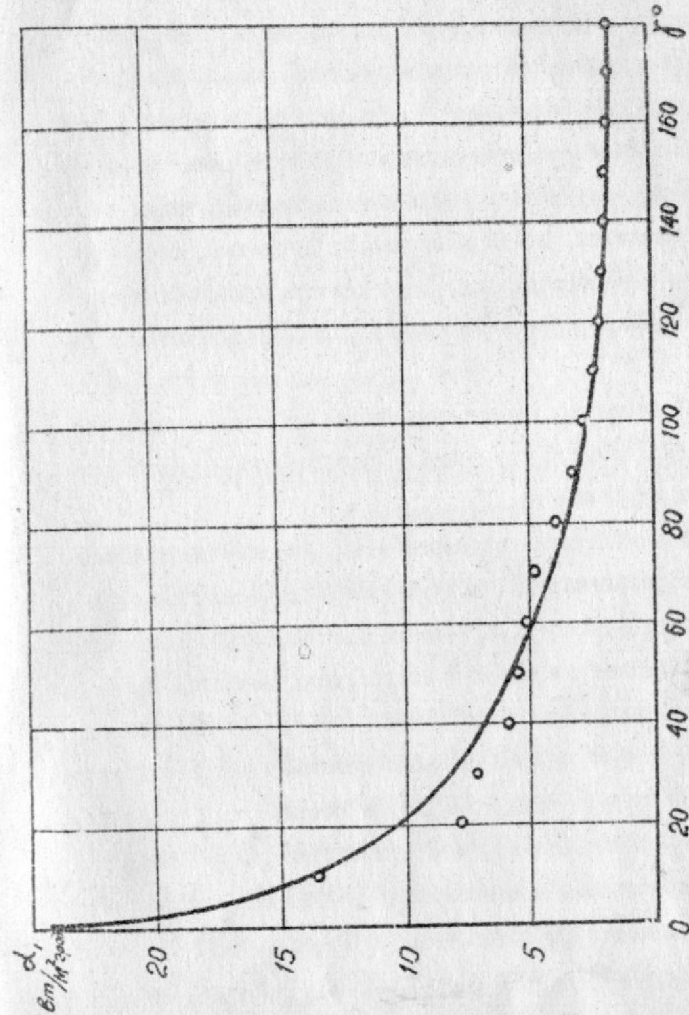


Рис.4. Изменение локального коэффициента теплоотдачи от угла.

ношении для "сухого" теплообмена.

Средние коэффициенты теплоотдачи в явном теплообмене, полученные независимо, с помощью метода балансов и оптическим методом, показывают, что для всего диапазона нагрузок они в основном соответствуют расчетным значениям, вытекающим из известных в литературе зависимостей. При этом необходимо учитывать наличие массообмена при выпадении влаги и инея на поверхности охлаждения и лучистого теплообмена. Причем, вклад этих составляющих меняется, когда поверхность достигает температуры точки росы или инеобразования. В частности, при переходе точки инеобразования лучистая составляющая может возрасти в десятки раз.

Оптический метод позволяет определить локальные значения коэффициента теплоотдачи с учетом одновременного течения процессов тепло-и массообмена.

Совпадение результатов экспериментов, обработанных тепловым методом, с результатами, полученными оптическим методом, подтверждает справедливость отношения Льюиса, использованного в расчетах коэффициентов тепло-и массоотдачи тепловым методом.

Полученные формулы для явного теплообмена при наличии или отсутствии массообмена и также для массообмена имеют одинаковые значения показателя степени (1/4) и постоянной (отклонение около 1,72 %). Это значит, что существует полная аналогия между процессами тепло-и массообмена в указанных условиях эксперимента, которая подтверждается работой Бермана Л.Д.

Теплообмен для горизонтальных труб в условиях естественной конвекции при ламинарном режиме определяется следующей лите-

ратурной формулой

$$Nu = 0,53 (Gr Pr)^{0,25} \quad (3)$$

Как видно, результаты наших данных по тепло-и массообмену совпадают с результатами, опубликованными в литературе по "сухому" теплообмену (отклонение для теплообмена составляет 9,43% и массообмена -11,30 %). Это показывает, что в указанных условиях процесс массообмена не влияет на процесс явного теплообмена.

Коэффициенты массоотдачи, рассчитанные по формуле Исаченко, хорошо согласуются с экспериментальными данными и имеют максимальные расхождения до 18 %.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА НА РЕБРИСТЫХ ТРУБАХ

В работе рассматривается решение задачи о тепло-и массообмене вертикальной плоскости в условиях естественной конвекции, допуская, что :

1. Процесс тепло-и массообмена стационарный.
2. Ламинарное течение в пограничном слое.
3. Соблюдается неизменность физических параметров.
4. Возможно применить уравнение сохранения массы для условий достаточно малого изменения плотности среды. При этом, однако, изменения плотности оказываются достаточными для существования тепловой подъемной силы, соизмеримой с силами инерции и трения.

№ 0.14404

Одесский технологический институт пищевой промышленности им. С.П. Корженко
БИБЛИОТЕКА

5. Градиент давления равен нулю.

6. Градиент скоростей в направлениях U и Z равен нулю.

7. $\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ стремятся к нулю.

Уравнения сохранения массы, движения, энергии и диффузии записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + g \frac{T_{\text{нел}} - T_0}{T_0} \theta \quad (5)$$

$$u_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + u_y \frac{\partial \theta}{\partial y} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (6)$$

$$u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (7)$$

Методика Польдгаузена позволяет получить решение для профилей скорости, температуры и диффузии в зависимости от значения и критерией $Pr - Sc$ и представить его в виде графиков, из которых можно определить коэффициенты тепло- и массоотдачи через градиент температуры или диффузии в среде, прилегающей к стенке.

Согласно решению, при $Pr = Sc = 0,73$ (воздух), местные коэффициенты тепло- и массоотдачи определяются формулами:

$$\alpha_x = 0,389 (Gr Pr)^{0,25} \frac{\lambda}{x} \quad (8)$$

$$\beta_{f,x} = 0,389 (Gr Sc)^{0,25} \frac{D}{x} \quad (9)$$

Далее приводится решение задачи о влиянии формы и конечных размеров оребренной поверхности на тепло- и массообмен. Рассмотрим элемент плоской вертикальной поверхности $dx dz$ (рис. 5). Значение локального коэффициента теплоотдачи можно представить следующим образом:

$$\alpha_x = cx^{-1/4} \quad (10)$$

где
$$c = 0,389 \lambda \left(\frac{g \theta}{\nu^2} Pr \right)^{0,25} \quad (11)$$

$$\Delta F \theta = \sum_{z_1}^{z_2} \int_0^l \alpha_x \theta(x, z) dx dz \quad (12)$$

Допуская, что температуры поверхности и воздуха постоянные, т.е. $\theta(x, z) = \theta = \text{const}$, то

$$\Delta F = \int_{z_1}^{z_2} \int_0^l \alpha_x dx dz = \frac{4}{3} c \int_{z_1}^{z_2} l^{3/4} dz \quad (13)$$

Если рассмотреть вертикальное круглое ребро и допустить, что толщина пограничного слоя стремится к нулю, то можно выделить два района, где условия формирования и существования пограничных слоев различны. Как видно из рис. 6, длины l_1 и l_2 могут быть определены следующим образом:

I района
$$l_1 = r_p \left[\sqrt{1 - m^2 \sin^2 \varphi} - m \cos \varphi \right] \quad (14)$$

II района
$$l_2 = 2 r_p \sqrt{1 - \left(\frac{z}{r_p} \right)^2} \quad (15)$$

где r - радиус трубы; r_p - радиус ребра; $m = \frac{r}{r_p}$.

Подставляя величины l_1 и l_2 в уравнение (13), получим:

$$\Delta F (r_p^2 - r^2) = \frac{4}{3} c \left\{ 4 \int_0^r l_1^{3/4} dz + 2 \int_r^{r_p} l_2^{3/4} dz \right\} \quad (16)$$

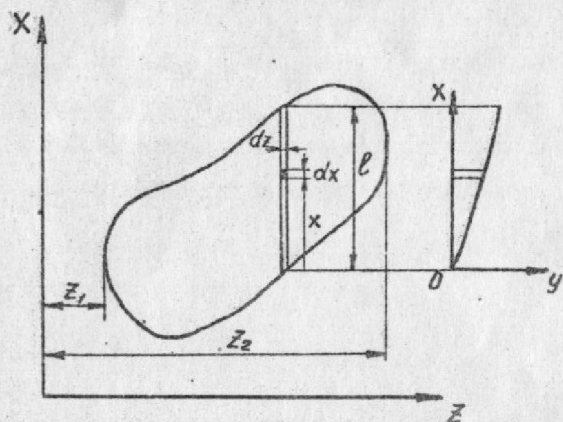


Рис.5. Расчетная схема для определения локального значения коэффициента теплоотдачи для вертикальной пластины произвольной конфигурации.

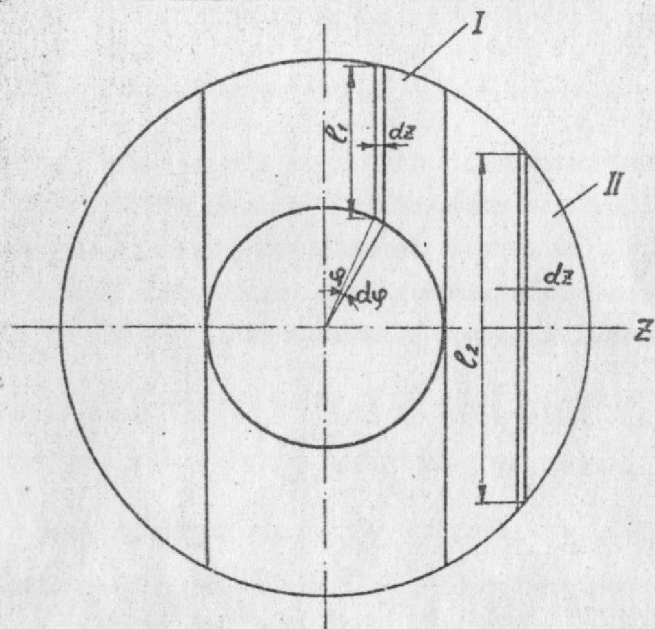


Рис.6. Расчетная схема для определения локального значения коэффициента теплоотдачи для вертикального кругового ребра.

Если эквивалентный диаметр, который определяется как

$$d_s = \frac{\pi(r_p^2 - r^2)}{2r_p}, \quad (17)$$

является определяющим размером, то можно получить следующие формулы :

$$Nu = 0,519 (Gr Pr)^{0,25} m \quad (18)$$

$$Sh = 0,519 (Gr Sc)^{0,25} m, \quad (19)$$

где

$$M = \left[-\frac{4}{\pi(1-m^2)} \right]^{3/4} \left\{ m \sqrt{2} \int_0^{\pi/2} [V1-m^2 \sin^2 \varphi - m \cos \varphi]^{3/4} \times \right. \\ \left. \times \cos \varphi d\varphi + \int_m^1 \left[1 - \left(\frac{z}{r_p} \right)^2 \right]^{3/8} d \left(\frac{z}{r_p} \right) \right\} \quad (20)$$

Как видно из уравнения (20), параметр M зависит только от отношения диаметров, т.е. величины m. График зависимости параметра M от величины m представлен на рис.7.

Эти результаты можно представить приближенно линейной зависимостью, для предела величины m = 0,67, с максимальной погрешностью около 2,5 % следующего вида :

$$M = 1,0093 + 0,15m. \quad (21)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА НА РЕБРИСТЫХ ТРУБАХ

Величина оптимального шага была выбрана с помощью оптического метода, который позволил визуально наблюдать пограничные слои, оценить характер их взаимодействия. На основании наблюдений было установлено, что для трубы № 3 оптимальный шаг составляет 10 мм, соотношение эквивалентного диаметра к шагу ре-

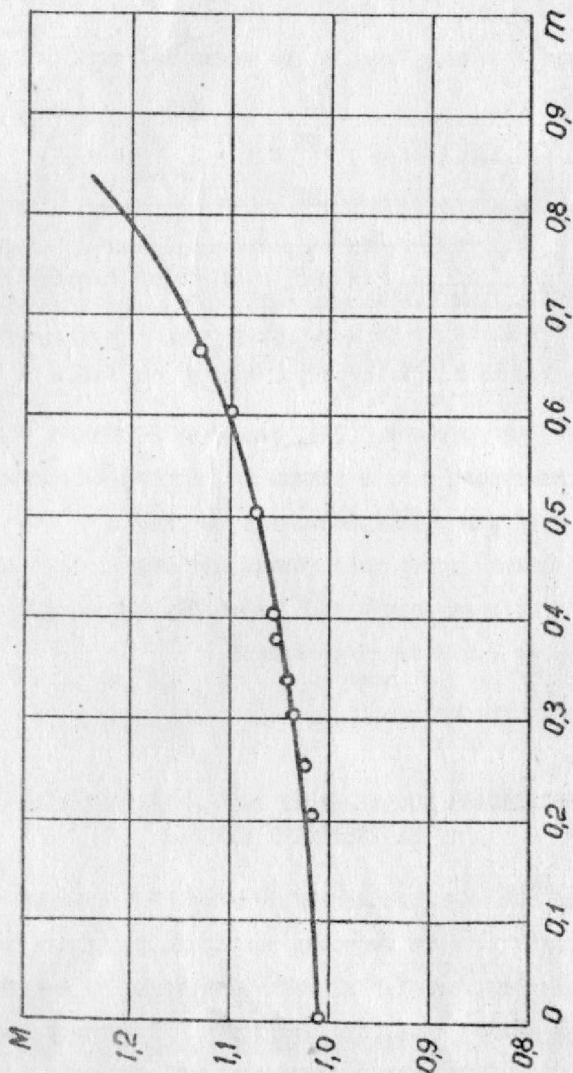


Рис.7. Изменение параметра M в зависимости от отношения диаметров .

бер приближенно равно 6 + 7 .

Отношение эквивалентного диаметра d_3 к расстоянию между ребрами ω , которое в данной работе меняется от 6 до 10, хорошо согласуется с отношением высоты вертикальных пластин к оптимальному расстоянию между ними в работе Фитцроя.

Получены экспериментальные данные по тепло-и массообмену для ребристых поверхностей (трубы № 4,5,6) при горизонтальном их расположении в условиях естественной конвекции при значении чисел $GrPr$ и $GrSc$ от 10^3 до 10^6 . На рис.8 приведены зависимости чисел $lg Nu$ от $lg GrPr$. Результаты тепло-и массообмена разных труб были обобщены с использованием ЭВМ и представлены соответственно следующими формулами :

Труба № 4

$$Nu = 0,28 (GrPr)^{0,25} , \quad (22)$$

$$Sh = 0,29 (GrSc)^{0,25} \quad (23)$$

Труба № 5

$$Nu = 0,35 (GrPr)^{0,25} , \quad (24)$$

$$Sh = 0,37 (GrSc)^{0,25} \quad (25)$$

Труба № 6

$$Nu = 0,49 (GrPr)^{0,25} , \quad (26)$$

$$Sh = 0,50 (GrSc)^{0,25} , \quad (27)$$

где d_3 является определяющим размером в этих уравнениях .

Погрешности эксперимента по тепло-и массообмену составили около 16 % и оценка погрешности полученных результатов, проведенная методом наименьших квадратов, была в пределах 2 + 8 %.

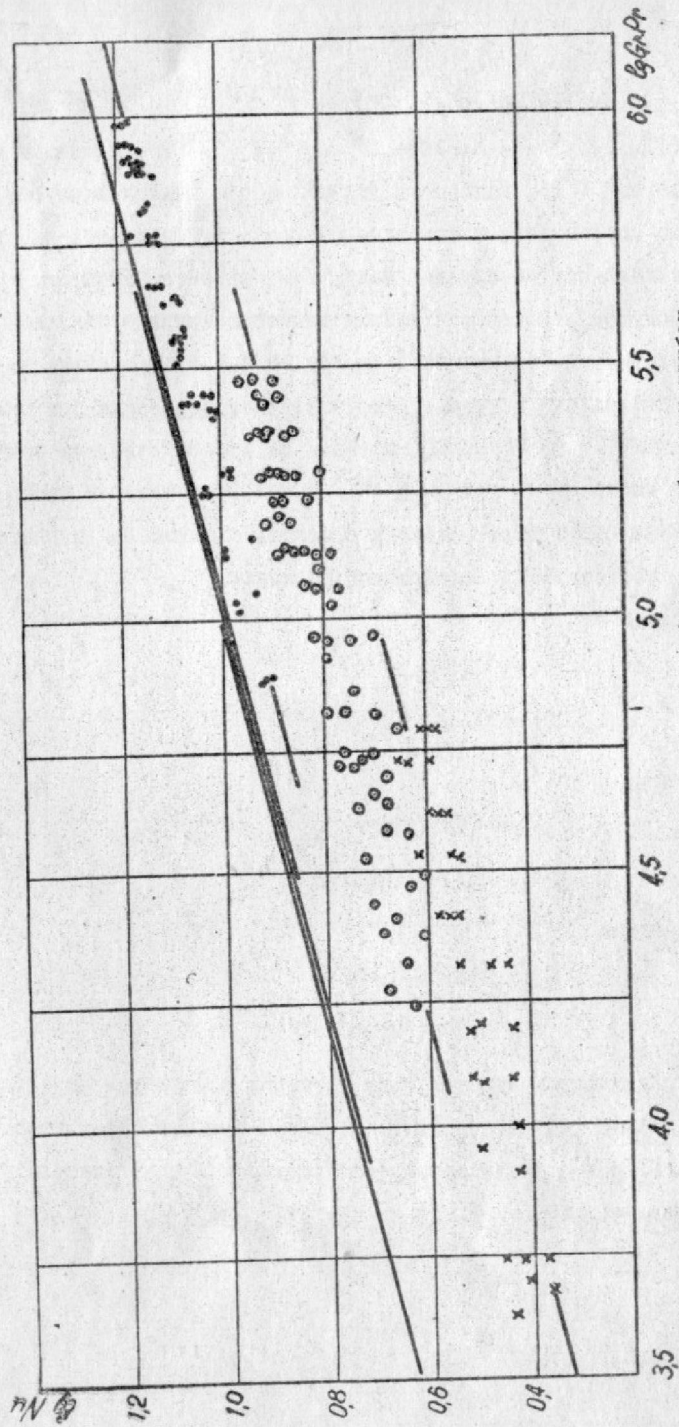


Рис.8. Экспериментальные данные по теплообмену на ребристых трубах (x - труба № 4, o - труба № 5, • - труба № 6, --- - аналитическое решение).

Эленбаас, анализируя данные по теплообмену для вертикальных каналов в условиях свободной конвекции, предложил следующее безразмерное соотношение :

$$(Nu)_{\Gamma_{\text{гид}}} = f \left[\frac{\Gamma_{\text{гид}}}{L} (GrPr)_{\Gamma_{\text{гид}}} \right], \quad (28)$$

где $\Gamma_{\text{гид}}$ - гидравлический радиус и L - длина вертикального канала.

Анализ формулы (28) с учетом размеров ребра показал, что форма этого соотношения применима также в случае вертикальных ребер, поэтому его использовали для обобщения полученных данных по теплообмену в условиях свободной конвекции для оребренной поверхности.

Наши опытные данные приводятся к такому виду, если принять, что два вертикальных ребра со средней длиной d , подобны двум вертикальным параллельным пластинам или вертикальным каналам, имеющим длину L , внешний диаметр ребра d_p подобен ширине пластины H - в случае вертикальных параллельных пластин или высоте ребра H для канала - в случае вертикальных каналов. Расстояние между ребрами ω , в нашем случае, подобно расстоянию между вертикальными параллельными пластинами W или расстоянию между вертикальными ребрами канала W . Здесь расстояние между ребрами мало, по сравнению с внешним диаметром ребра, поэтому можно считать, что эти ребра подобны вертикальным и параллельным пластинам или узким вертикальным каналам, где, в последнем случае, наличие основания ребра не влияет на коэффициент теплоотдачи.

Опытные данные в такой форме представлены на рис.9, где также приведены кривые для плоских и параллельных пластин, предложение Эленбаасом, а также Бодойя и Острелом. Результаты Старнера и Лакмануса и результаты Веллинга и Булдриджа представлены на рис.9, для сравнения с нашими экспериментальными данными.

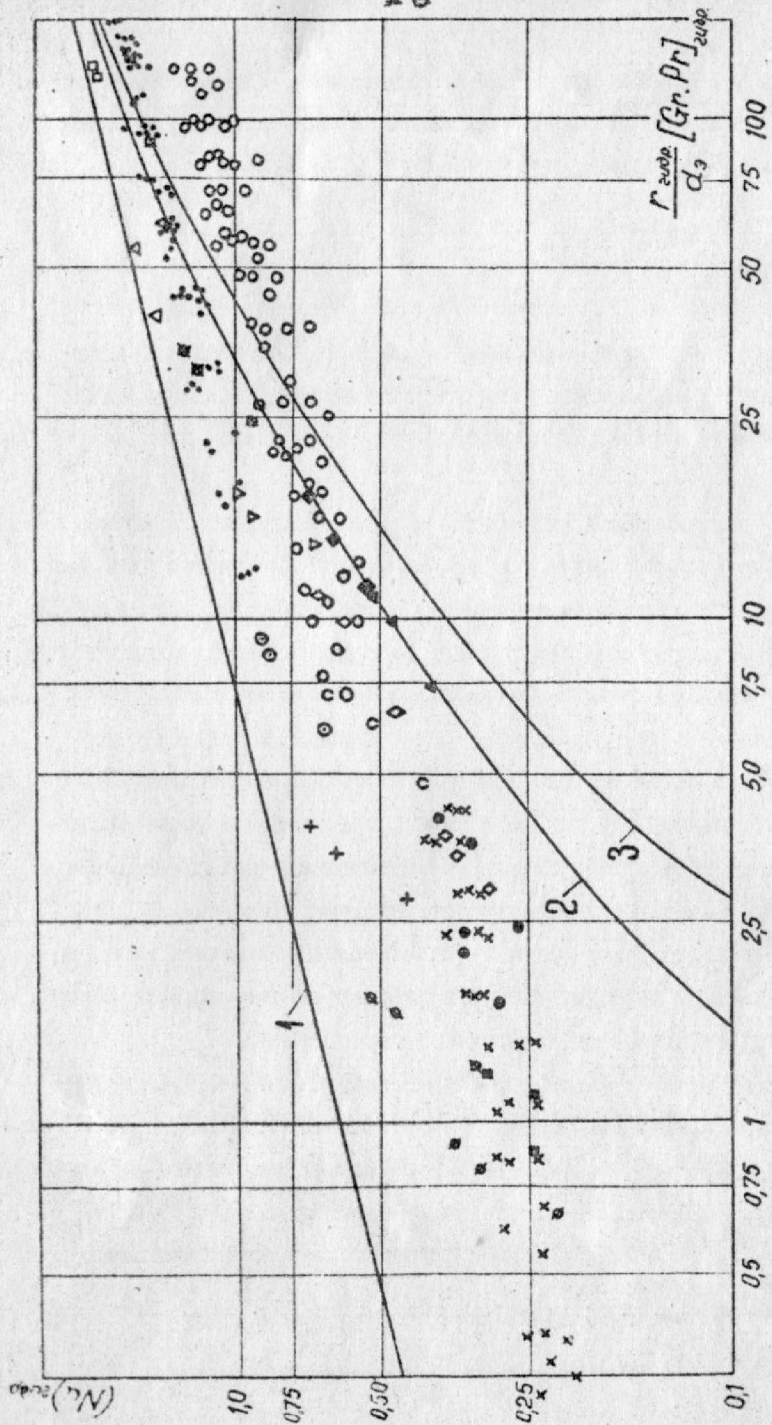


Рис.9. Сопоставление наших экспериментальных данных по теплообмену с литературными данными.
1-плоская пластина, 2-закрытый канал квадратного сечения, 3-бесконечные параллельные пластины.

Из рис.9 следует, что наибольшее значение числа Нуссельта соответствует кривой для вертикальной плоской пластины.

Ниже кривой для вертикальной плоской пластины лежат опытные данные для вертикальных ребренных поверхностей. Эти опытные точки имеют приблизительно такие же значения числа Нуссельта, как для данных по параллельным пластинам или каналам квадратного сечения.

Из рис.8 видно, что экспериментальные и теоретические результаты по теплообмену, а также по массообмену ребристых труб не согласуются. Например, для трубы № 4 экспериментальные данные, в сравнении с теоретическими, меньше на 51,1 %, в случае теплообмена, и на 49,1 % - в случае массообмена; для трубы № 5 соответственно - на 36,6 % и 32,3 % и для трубы № 6 - на 12,4% и 9,2 %.

Одновременно экспериментальные и теоретические результаты коэффициентов эффективности ребра согласуются. Для трубы № 4 экспериментальные результаты меньше, по сравнению с теоретическими результатами, на 0,05 %, а для трубы № 5 соответственно - 1,7 %, а для трубы № 6 - 3,4 %, где при расчете коэффициентов эффективности ребра по теоретическим зависимостям в уравнение подставлялись средние экспериментальные значения коэффициентов теплоотдачи.

Это свидетельствует о том, что размеры ребристых труб (высота ребра и расстояния между ребрами) оказывают влияние на процесс тепло-и массообмена.

Предидущие расхождения показывают, что ребристые трубы имеют оптимальные высоты ребра и расстояния между ними, при которых коэффициенты теплоотдачи стремятся к коэффициентам теплоотдачи

единичной вертикальной плоской пластины. Таким образом, возможны случаи, когда увеличение площади оребренной поверхности приводит к уменьшению теплоотдачи, что подтверждается работой Веллингга и Вулдрида.

Расхождение между аналитическими и экспериментальными результатами уменьшается с увеличением высоты ребра h и стремится к нулю, когда h стремится к бесконечности. Расхождение можно объяснить влиянием пограничного слоя, образующегося вокруг трубы. Если принять это предположение, то можно обобщить экспериментальные результаты по теплообмену и по аналогии по массообмену следующими уравнениями:

$$Nu = 0,519 (Gr Pr)^{0,25} \cdot \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \quad (29)$$

$$Sh = 0,519 (Gr Sc)^{0,25} \cdot \left(1 - \frac{h_0}{h}\right), \quad (30)$$

где $1 - \frac{h_0}{h}$ — дополнительный фактор учитывает влияние пограничного слоя; h_0 — равен 5,6 мм; h — высота ребра в мм.

Введение дополнительного фактора $\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)$ в формулы (29), (30) позволяет лучше описать физику процессов тепло-и массообмена, т.к. учитывает пограничные тепловой и диффузионный слои у поверхности теплообмена. Результаты сопоставления расчетов, проведенных по формулам (29), (30), с экспериментальными данными по тепло-и массообмену хорошо согласуются. Формула (29) для теплообмена дает отклонение результатов счета, в сравнении с экспериментом, на -9,8 % для трубы № 4 и +11,0 % для трубы № 5; для трубы № 6 соответственно -7,2%, что находится в пределах погрешности эксперимента. Формула (30) для массообмена дает также отклонение результатов счета, в сравнении с экспериментами, на +10 %.

Из формул (29), (30) следует, что когда высота ребра являет-

ся большей, в сравнении с диаметром трубы d , то величина $\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)$ стремится к единице. В этом случае коэффициенты тепло-и массоотдачи стремятся к теоретическим значениям (18), (19). Когда высота ребра, уменьшаясь, стремится к размеру 5,6 мм, то коэффициенты тепло-и массоотдачи от ребра также стремятся к нулю. При этом ребра получаются изолированными, прилегающими к поверхности трубы и межреберному промежутку пограничным слоем. В этом случае приведенные значения коэффициентов тепло-и массоотдачи ребристой поверхности стремятся к минимальным значениям, но не к нулю. Поэтому для размеров ребер $h = 5,6$ мм зависимости (29), (30) непригодны для расчетов коэффициентов переноса тепла и массы. Оптимальная высота ребра h может быть определена из следующего условия:

$$\left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \geq 0,9 \text{ или } \geq 56 \text{ мм.}$$

Предыдущие уравнения и оптимальная высота ребра справедливы только для случая, когда шаг или расстояние между ребрами \geq оптимальному шагу или оптимальному расстоянию между ними.

Далее проведена оценка стоимости единицы количества тепла, передаваемого оребренной и гладкой трубами, при условии, когда ребристые и гладкие трубы имеют одинаковые диаметры d и длины труб l (1 м), при одинаковых перепадах температур. Для каждого диаметра трубы расчеты велись для двух значений толщин стенок трубы, применяемых в технике.

Стоимость тепла, примерно, определялась как количество тепла, отнесенное к стоимости массы поверхности теплообмена. В таблице 2 приведены данные расчета для гладких и оребренных труб.

Таблица 2

№ п/п	Труба №	$t_{\text{ср}}$, мм	d_0 , мм	$\frac{\alpha_{\text{реб}}}{\alpha_{\text{гл}}}$	$\frac{F_{\text{реб}}}{F_{\text{гл}}}$	$\frac{V_{\text{реб}}}{V_{\text{гл}}}$	$\frac{\alpha_{\text{реб}}}{\alpha_{\text{гл}}} \cdot \frac{F_{\text{реб}}}{F_{\text{гл}}} \cdot \frac{V_{\text{гл}}}{V_{\text{реб}}}$
1	4	1	25,12	0,550	9,16	4,600	1,095
2	4	2	25,12	0,550	9,16	2,800	1,800
3	5	1	44,80	0,639	8,25	4,565	1,125
4	5	3	44,80	0,639	8,25	2,188	2,340
5	6	1	69,90	0,870	10,38	7,900	1,080
6	6	3	69,90	0,870	10,38	3,300	2,570

Как и следовало ожидать, применение ребренных поверхностей в условиях естественной конвекции экономически более целесообразно, по сравнению с гладкими трубами.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Доказана правомерность применения оптического метода для определения локальных и средних значений коэффициентов теплоотдачи для гладких труб при сухом теплообмене или даже при наличии влажного теплообмена с выпадением влаги в виде капель или инея.

2. Для гладких горизонтальных труб в условиях естественной конвекции, в пределах изменения числа Ra от 10^3 до 10^6 и при нормальных параметрах окружающего воздуха, средние значения коэффициентов теплоотдачи, полученные оптическим методом, хорошо согласуются с коэффициентами теплоотдачи, полученными методом теплового баланса.

3. При условиях, указанных в пункте 2, подтверждено предположение Льюиса о постоянстве соотношения коэффициентов переноса $\frac{\alpha}{\beta} = C_p = 0,24 + 0,45 d_0$.

4. Подтверждена аналогия между процессами тепло- и массообмена при выполнении условий пункта 2, т.е. при условии равенства чисел Прандтля и Шмидта, критерий Нуссельта равен критерию Шервуда.

5. Процесс массообмена не влияет на процесс явного теплообмена. В этом случае коэффициент теплоотдачи в явном теплообмене, при наличии или отсутствии процесса массообмена, не изменяется, если правильно учитывается лучистый теплообмен.

6. Оптический метод позволяет оценить величину оптимального шага ребер на цилиндрической поверхности. Полученные опытные данные позволили установить, что $d_0 / s \approx 6,0 \div 7,0$.

7. Для ребристых труб, расположенных в горизонтальном положении при естественной конвекции, при стационарном ламинарном течении в пограничном слое и определяющем размере, равном эквивалентному диаметру, можно найти коэффициенты теплоотдачи, а также по аналогии коэффициенты массоотдачи по следующим аналитическим уравнениям:

$$Nu = 0,519 (Gr Pr)^{0,25} M,$$

$$Sh = 0,519 (Gr Sc)^{0,25} M,$$

где M - безразмерная геометрическая характеристика ребристого элемента, зависящая от отношения диаметра трубы к диаметру ребра.

8. Экспериментальные данные по тепло- и массообмену для ребристых труб в условиях, указанных в пункте 7, обобщаются с максимальным расхождением около 11% следующими уравнениями:

$$Nu = 0,519 (Gr Pr)^{0,25} \left(1 - \frac{h_0}{h}\right),$$

$$Sh = 0,519 (Gr Sc)^{0,25} \left(1 - \frac{h_0}{h}\right),$$

где $h_0 = 5,6$ мм и высота ребра $h > 5,6$ мм, в этой формуле является определяющим размером.

Результаты расчетов по аналитическим зависимостям хорошо согласуются с экспериментальными данными при больших значениях высот ребер. Сопоставление результатов счета по теоретическим зависимостям с экспериментальными данными позволило получить выражение для определения оптимальной высоты ребра $\left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \geq 0,9$ или $h \geq 56$ мм. Эти результаты справедливы для условий, когда шаг ребер равен оптимальному или больше его.

Здесь можно отметить, что при значениях оптимальных высот и шагов ребер коэффициенты тепло-и массоотдачи имеют максимальные значения.

9. Полученные аналитические и экспериментальные зависимости по тепло-и массообмену позволяют более точно обосновать величины площадей ребристых поверхностей охлаждения, которые применяются для торгового оборудования и холодильных шкафов, открытых и закрытых охлаждающих витрин, при условии естественной конвекции воздуха.

ПУБЛИКАЦИИ ПО РАБОТЕ

1. Исследование тепло-и массообмена ребристых поверхностей оптическим методом. Аспирант Эль-Риди Медхат Котб. Тезисы докладов к Всесоюзной научно-технической конференции молодых специалистов по холодильной технике и технологии, г.Москва, 1973.

2. Исследование тепло-и массообмена тепловым и оптическим методом. Эль-Риди Медхат Котб, Чумак И.Г., Калинин Л.Г. (принята к печати), журнал "Холодильная техника", г.Москва, 1974.