

Автореф
А13

проф. Эдману М.Б.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

АБДУЛ ШАКУР ХАН

УДК 621.565

УДК 536.244

ИНЕОБРАЗОВАНИЕ И ТВОМАССОБМЕН В ПРОФИЛЬНЫХ
КАНАЛАХ ПРОКАТНО-СВАРНЫХ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ

Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты холо-
дильной и криогенной техники
и систем кондиционирования

Специальность 05.14.05 - Теоретические основы теплотехники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1988

xv852

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
холодильной промышленности

- Научные руководители - доктор технических наук
Калнинь И.М.
- кандидат технических наук,
доцент Никульшин Р.К.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Жадан В.З.
- кандидат технических наук
Чернозубов А.М.
- Ведущая организация - Всесоюзный научно-исследовательский,
конструкторский, проектно-технологический инженерный центр "Биотехника".

Защита диссертации состоится "2" июня 1988 г.
в 11 часов на заседании специализированного совета К.068.27.01
при Одесском технологическом институте холодильной промышленности
по адресу: 270057, г.Одесса, ул.Петра Великого, 1/3, ОТИХП.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИХП.

Автореферат разослан "2" июня 1988 года

ный секретарь
зованного совета,
цент

Р.К.Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение эффективности теплообменной аппаратуры является важной задачей современного энергомашиностроения, в решении которой применению легких сплавов на основе алюминия отводится заметная роль. Прокатно-сварные алюминиевые теплообменники, изготовленные прокаткой из листового или рулонного материала, имеют существенно меньшую металлоемкость, меньшее энергопотребление на прокачку теплоносителя, более высокую тепловую эффективность, лучшую технологичность в производстве, затрачивают меньше дефицитных материалов в сравнении с ребристо-трубчатыми аппаратами. В литературе имеются данные, показывающие перспективность применения профильных прокатно-сварных поверхностей в конденсаторах воздушного охлаждения холодильных агрегатов торгового оборудования (ТХО). Актуальной становится задача применения таких поверхностей в прокатно-сварных воздухоохладителях фреоновых холодильных машин (ФСВО), в частности, торгового холодильного оборудования, биотехнологии и других областях. Это позволит повысить технический уровень не только холодильных машин, но и всего оборудования в целом, что, принимая во внимание крупносерийность производства ТХО, технологических камер биотехнических лабораторий, сортоиспытательных станций и т.д., даст заметный экономический эффект. Однако, решение этой задачи тормозится из-за отсутствия сведений по инееобразованию и тепломассообмену в профильных каналах прокатно-сварных воздухоохладителей, что не позволяет выработать научно обоснованные рекомендации по их расчету и проектированию.

Цель работы. Изучение закономерностей процессов инееобразования, тепломассообмена, теплофизических свойств инея в профильных каналах ФСВО в зависимости от условий эксплуатации применительно к среднетемпературному ТХО и близкого к нему биотехнологического и сортоиспытательного оборудования и создание научных основ инженерного расчета тепломассообменных характеристик ФСВО и методов его оттайки.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- расчетно - теоретический анализ гидродинамики отрывных течений, инееобразования и тепломассообмена в каналах ФСВО;
- экспериментальное исследование инееобразования, теплофизических свойств инея, его термического сопротивления в каналах ФСВО и методов оттайки;
- экспериментальное исследование тепло- и массообмена в каналах ФСВО в условиях инееобразования. Соблюдение аналогии между тепло- и массообменом в этом случае.

- обобщение полученных данных. Разработка инженерных методик расчета инееобразования, тепло- и массообмена и периодичности оттайки ПСВО для ТХО, биотехнологического и сортоиспытательного оборудования.

Научная новизна работы заключается в получении, анализе и обобщении новых теоретических и экспериментальных данных по закономерностям гидродинамики, инееобразования и тепломассообмена при течении влажного воздуха в профильных каналах ПСВО с регулярными диффузор-конфузорными и плоскими участками по ходу воздуха.

В диссертации защищается следующее основное научное положение

При течении влажного воздуха в каналах прокатно-сварных воздухоохладителей регулярная диффузор-конфузорная профильность каналов приводит к большему росту теплообмена в сравнении с массообменом, т.е. к нарушению аналогии между тепло- и массообменом в сторону теплообмена, что обуславливает увеличение числа Льюиса до $Le = 1,2$, превышение Nu над Sh на 30-40%, образованию плотного с высокой теплопроводностью слоя инея.

Наиболее существенные новые научные результаты, полученные в работе.

1. На основе решения системы уравнений Навье-Стокса, сплошности, энергии и обмена массы для несжимаемой жидкости разработан полуэмпирический метод и алгоритм расчета гидродинамики, инееобразования и тепломассообмена при течении влажного воздуха в профильных каналах ПСВО. Программа расчета реализована на языке PL-I на ЭВМ ЕС1055.

2. Получены новые экспериментальные данные по инееобразованию, теплофизическим свойствам инея, тепло- и массообмену в профильных каналах ПСВО для условий, характерных для ТХО, биотехнологии и близких к ним областей.

3. Проведено обобщение экспериментальных данных по тепло- и массообмену в каналах ПСВО, получены критериальные зависимости простого вида, пригодные для инженерных расчетов коэффициентов тепло- и массообмена, а также эмпирические соотношения для расчета толщины слоя инея.

4. Показано определяющее влияние профильности каналов ПСВО на тепло- и массообменные характеристики. Установлено, что регулярность чередования диффузор-конфузорных участков с плоскими приводит к существенному превышению теплообмена над массообменом, нарушению аналогии между тепло- и массообменом в сторону теплообмена и росту числа Льюиса до $Le = 1,2$.

Практическая ценность работы заключается в получении расчетных зависимостей для инееобразования, теплофизических свойств инея, коэффициентов тепло- и массообмена с учетом влияния профиля канала и режимных характеристик, пригодных для инженерной практики; данных по частоте оттайки, необходимых для создания высокоэффективных воздухоохладителей нового типа, позволяющих значительно снизить их массу и габариты.

Результаты работы приняты к практическому использованию в ВНИИ Холодмаш (г.Москва), ВНИКТИХолодпроме (г.Москва), ВНИПО "Ветприбор" (г.Одесса), ВНИЦ "Биотехника" (г.Одесса).

Апробация работы. Основные научные результаты, выводы и рекомендации докладывались и получили положительную оценку на Всесоюзной научно-практической конференции "Интенсификация производства и применения искусственного холода" (г.Ленинград, 1986 г.); Всесоюзной научно-практической конференции "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса" (г.Кишинев, 1987 г.); научных конференциях профессорско-преподавательского состава ОТИХП в 1986, 1987, 1988 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликована одна работа и находится в печати одна работа.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений. Объем работы: 132 страницы основного текста, 88 рисунков, 12 таблиц и 40 страниц приложений. Библиография содержит 230 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ работ по применению легких сплавов в теплообменном аппаратостроении, конструкций фреоновых воздухоохладителей, процессов инееобразования и тепломассообмена на охлаждаемых поверхностях разных форм, методов интенсификации внешнего теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения показал, что существенный рост теплообмена (не осложненного массообменом) обеспечивают профильные каналы переменного сечения с шероховатостями в виде выемок, прямых и обратных уступов и т.п., в которых имеются участки с положительным и отрицательным градиентом давления. Однако, для условий инееобразования какие-либо данные по тепло- и массообмену в таких каналах отсутствуют. В силу большой сложности протекающих процессов теоретические расчеты отрывных течений в каналах сложной формы предполагают знание ряда коэффициентов, коррелирующих расчеты по ходу их выполнения и сводящие полученные результаты к полуэмпирическим.

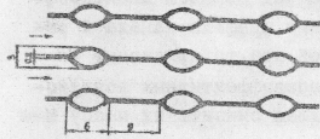


Рис.1. Фрагмент пакета ПСВО

Для расчетно-теоретического исследования процессов инеобразования и тепло-массообмена в профильных каналах ПСВО была разработана математическая модель, в основу которой положена следующая система уравнений, описывающая течение вязкой жидкости при знакопеременном градиенте давлений, теплообмен, осложненный массообменом с образованием твердой фазы инея на теплообменной поверхности, изменение толщины слоя инея во времени и расход теплоносителя (воздуха). Результаты расчета должны допускать возможность экспериментальной проверки путем прямого теплотехнического эксперимента.

Уравнение движения двумерной вязкой несжимаемой жидкости

$$|u| \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(M \cdot \varphi \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

Уравнение сплошности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} \Psi_i &= \text{const} \quad \text{при } x=0; \quad \Psi_i = u, v \\ \Psi_i &= 0 \quad \text{при } y = y_{ст}(x); \quad \Psi_i = u, v \\ v &= 0 \quad \text{при } y = H_k \end{aligned} \quad (3)$$

Замыкающее уравнение (уравнение расхода)

$$\int_{H_k} (\rho u) dy = \text{const}$$

на каждом расчетном шаге по времени.

Модель турбулентной вязкости

$$\begin{aligned} M_{эф} &= M_0 + M_T \\ M_T &= \rho l_{1,2}^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \end{aligned} \quad (4)$$

$$l_1 = B \left[1 - \exp \left(\sqrt{\frac{1}{\nu}} \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{\max} \frac{y}{A_1} \right) \right] y$$

$$l_2 = A_2 (H_k - y_{ст})$$

$$M_T(l_1) = M_T(l_2)$$

Уравнение энергии

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Граничные условия

$$T = \text{const} \quad \text{при } x=0$$

$$T = \begin{cases} T_{ст} \\ T_{ин} \end{cases} \quad \text{при } y = y_{ст}(x)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{при } y = H_k \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{iM} = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{iM-1}$$

Модель турбулентной теплопроводности

$$\lambda_{эф} = \lambda_0 + \lambda_T \quad (7)$$

$$\lambda_T = A_3 \rho c_p l_{1,2}^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|$$

Модель инеобразования

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_u}{\rho_u c_u} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (8)$$

$$\lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial y} = \alpha_H (T_0 - T_u) + \rho_u z_u \frac{d\delta_u}{dt} \quad (9)$$

при $y = \delta_u$

$$T = T_{ст} \quad \text{при } y = y_{ст}(x)$$

Система (1)-(9) решалась методом конечных разностей на прямоугольной сетке с постоянным и переменным шагом по координатам и времени по разработанному алгоритму и программе *JNHAK* на языке *PL-1* на ЭВМ *BC1055*. На рис.2 - рис.4 в качестве примера приведены расчетные значения локальных коэффициентов теплоотдачи α_H , массоотдачи β и толщины слоя инея $\delta_{и}$ в зависимости от времени инеобразования.

Расчеты проводились в интервале параметров: $Re = 1500 \dots 14000$; $t_{вг} = -20^\circ\text{C} \dots -3^\circ\text{C}$; $t_{г} = +4 \dots +17^\circ\text{C}$; $\psi = 0,7 \dots 0,9$. Погрешность по α_H не более $\pm 16\%$, по β не более $\pm 12\%$.

На рис. 5 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Видно, что расчет дает правильную качественную картину, но количественные расхождения достигают 50% для малых ψ . Причина заключается не только в большой сложности рассматриваемых процессов, что затрудняет их полное математическое описание, но и главным образом, отклонением в соотношении Льюиса $Le = 1$ принятом в модели в большую сторону, т.е. нарушением аналогии между тепло- и массообменом.

Экспериментальные исследования инеобразования, тепло- и массообмена и теплофизических свойств инея проводились на разработанном для этой цели теплотехническом стенде, схема которого представлена на рис.6..

Фреоновая холодильная машина, состоящая из герметичного компрессора ФГ-0,125-4, водяного конденсатора 1, испарителя 15 (ПСВО), ресивера 2, РТО 9, регулирующего вентиля 16, фильтра-осушителя 8 обеспечивала охлаждение исследуемого аппарата. Она включала также фреоновый расходомер 24, теплоизолированную камеру 13 с фотоаппаратом 14, электронагревателем 5,25, вентилятор ПСВО 23. Измерительная аппаратура: 6,27 - ваттметры, 22 - психрометр, 3 - образцовые манометры, 30 - цифровой микровольтметр, 32 - крыльчатый анемометр, 33 - термоанемометр, 12 - термопары, 11 - влажная термопара, 10 - сборник конденсата. Вспомогательная аппаратура: 7,26 - автотрансформаторы, 19 - увлажнитель воздуха, 21 - выпрямитель тока, 29 - многоточечный переключатель. Дополнительные устройства: 17 - поддон, 18 - сепаратор, 20 - разбрызгиватель, 28 - сосуд Дьюара. Тепловой поток на воздухоохладитель определялся по расходу холодильного агента (расходомером и из теплового баланса водяного конденсатора) и вторым методом - по расходу воздуха через аппарат. Температуры в узловых точках

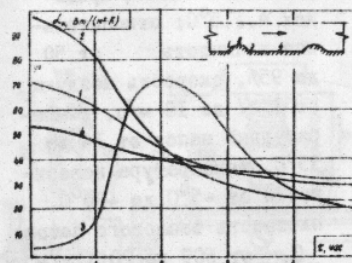


Рис.2. Локальные коэффициенты теплоотдачи α_H (расчет)

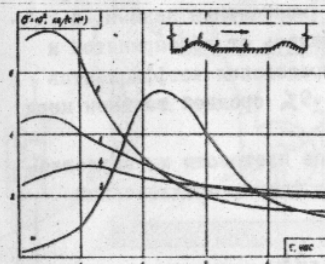


Рис.3. Локальные коэффициенты массоотдачи β (расчет)

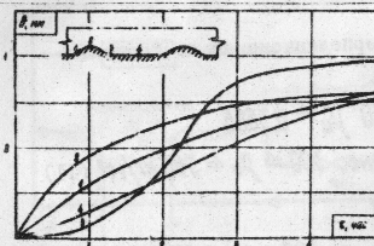


Рис.4. Локальные значения толщины слоя инея $\delta_{и}$ (расчет)

цикла, на поверхности канала и поверхности инея измерялись термопарами типа ХК и МК с точностью $0,2^\circ\text{C}$ с помощью цифрового микровольтметра Б7-27+2мкВ. Температура воздуха - лабораторными ртутными термометрами ТЛ-4 с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ и термопарами. Скорость воздуха измерялась термоанемометром ТА-8М с точностью $\pm 6\%$ и крыльчатым анемометром Б ГОСТ 6376-52 с точностью $0,05$ м/с. Давление в холодильной системе измерялось образцовыми манометрами класса 0,4. Электрическая мощность, потребляемая электронагревателями в камере - ваттметром Д57 класса 0,1. Влажность воздуха - психрометр Ассмана и психрометрическими термопарами. Толщина инея - фотографированием (рис.7) и методом температурного профиля с помощью специальной термопарной гребенки. Масса инея измерялась взвешиванием воды после оттайки и мерной ложкой, а также методом соскребывания пластмассовой лопаткой и взвешиванием на аналитических весах. Было проведено 13 серий из 115 опытов продолжительностью от 0,5 до 10 часов. (Таблица 1). Температура

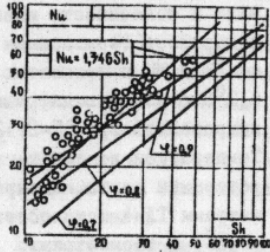


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по тепло- и массообмену в каналах ПСВО

же теплофизических свойств инея не отличалась от общепринятой и поэтому здесь не приводится. Точность определения коэффициентов теплообмена составила $\pm 12\%$, массообмена $\pm 9\%$, средней точности инея $\pm 2\%$.

Полученные экспериментальные данные по плотности инея удовлетворительно обобщаются с точностью $\pm 17\%$ в форме, предложенной Токурой, Сайте и Кишинами (рис. 8).

$$\frac{\rho_u}{\rho_l} = 0,006 \left[\left(\frac{\beta \cdot \tau}{d_f} \right) \left(\frac{\mathcal{L} d_f}{\lambda_s} \right) \right]^{0,3} \quad (10)$$

а теплопроводности - эмпирическими интерполяционными соотношениями (рис. 9).

$$\lambda_u = 2,699 \cdot 10^{-6} \rho_u^2 - 1,1465 \cdot 10^{-3} \rho_u + 0,3665$$

в диапазоне $300 \leq \rho_u \leq 500 \text{ кг/м}^3$ (II)

$$\lambda_u = 1,2676 \cdot 10^{-3} \rho_u - 0,0887$$

в диапазоне $200 \leq \rho_u \leq 300 \text{ кг/м}^3$

Установлено, что скорость инеобразования g_u в каждом данном режиме эксплуатации есть величина постоянная и колеблется от

воздуха на входе в аппарат изменялась в пределах $4..15^\circ\text{C}$; относительная влажность от 50 до 95%, скорость воздуха от 1.47 до 10 м/с, температурный напор от 14 до 35°C , температура поверхности от -5°C до -20°C . плотность теплового потока q_p от 609 до 2051 Вт/м^2 , коэффициент влаговыпадения M от 1,06 до 1,26.

Методика определения коэффициентов тепло- и массообмена по экспериментальным данным, а так-

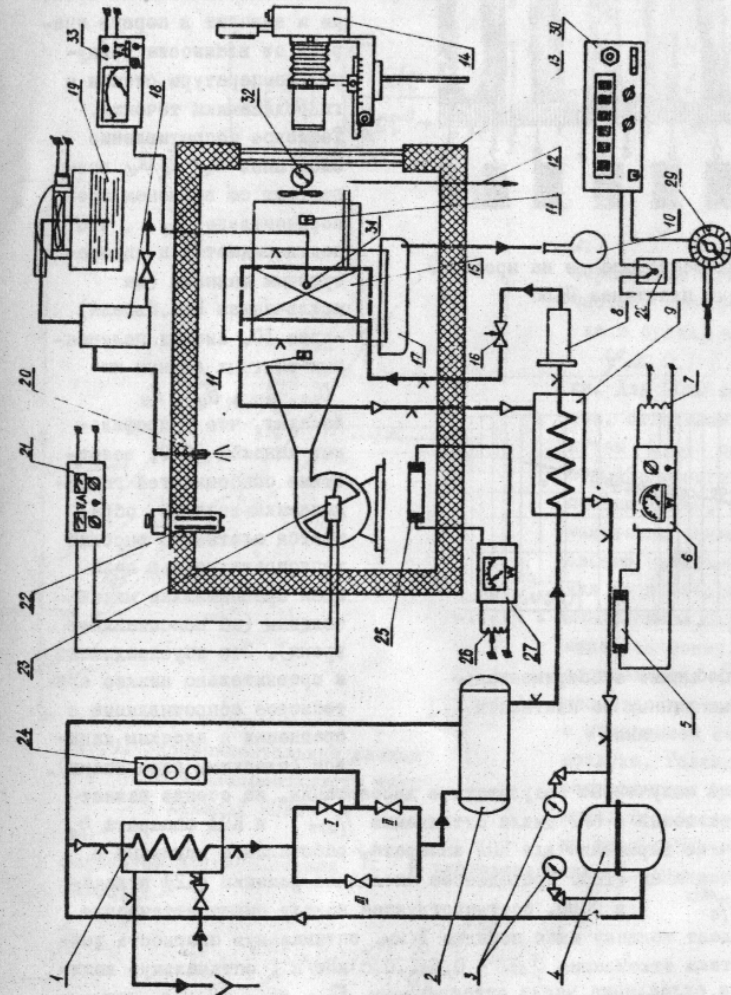


Рис. 6. Схема экспериментального стенда

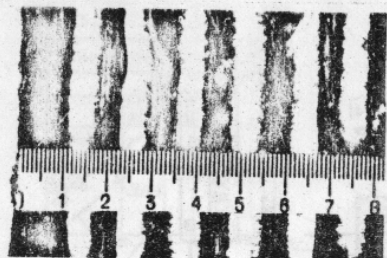


Рис.7. Инееобразование на профильных пластинах ПСВО

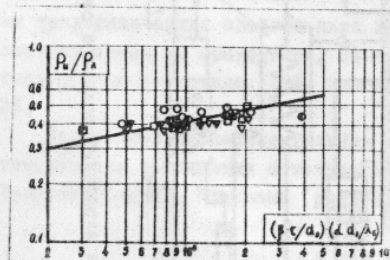


Рис.8. Обобщение экспериментальных данных по плотности инея

Опираясь на полученные результаты в диссертации, на основе известных представлений о КПД цикла оттаивания $\eta_{отт}$ и КПД аппарата η_a было получено выражение для КПД аппарата, работающего циклически в режиме оттаивания (12). Проведенное численное решение (12) показало, что η_a^{max} в ПСВО, соответствующее началу цикла оттаивания - рис.11 дает толщину инея порядка 3 мм, оптимальную плотность теплового потока оттаивания $q_{отт} = 0,6 \dots 0,8$ кВт/м², оптимальную величину цикла охлаждения между оттаиваниями $t_{охл} = 8 \dots 10$ час. при

режима к режиму в пределах $(10 \dots 80) 10^{-6}$ кг/(с·м²).

Толщина слоя δ_u растет асимптотически по времени и зависит в первую очередь от влажности воздуха, температуры стенки и гидродинамики течения. Тепловое сопротивление слоя инея $R_u = \delta_u / \lambda_u$ возрастает со временем пропорционально δ_u , что подтверждается и литературными данными (за исключением Б.К.Явнеля) - рис.10. Анализ полученных опытных данных по R_u , λ_u , δ_u , R_0 показал, что в профильных каналах ПСВО, вследствие особенностей гидродинамики течений, образуется плотный с высокой теплопроводностью слой инея сравнительно малой толщины (за сопоставимое время). Это обуславливает и сравнительно низкое его тепловое сопротивление в сравнении с плоским каналом (плоскими пластинами).

$$\eta_a = \frac{1}{3,6 \theta_m K_0 \tau_{охл} \left[1 + (0,0288 q_u' / \eta_{отт} q_{отт}') \right]^x} \left\{ 3,6 \theta_m \left[\int_0^{\tau_{охл}} \frac{d\tau}{(c\tau^n + 1/k_0)} \right] - 10,368 q_u' \left(\frac{1}{\eta_{отт}} - 1 \right) \right\} \quad (12)$$

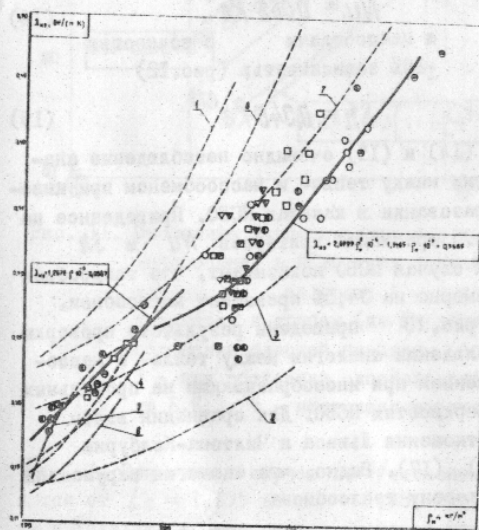


Рис.9. Экспериментальные данные по теплопроводности инея в каналах ПСВО

коэффициентом влаговываждения ξ и влажностью воздуха в виде зависимости:

$$\xi = 0,0071 \left(\frac{d}{d_u'} \right)^{2,75} + 1 \quad (13)$$

$0,7 < \varphi \leq 0,85$, что определяет оптимальную частоту оттаивания 3 раза в сутки, а при

$\varphi \leq 0,7$ - 2 раза в сутки. Для ПСВО тепловой поток, отводимый "сухим" путем $Q_{сух}$ составляет 80-90% полного теплового потока $Q_{пол}$, который монотонно снижается от своего начального значения до некоторого слабоменяющегося далее со временем значения. Влажная составляющая $Q_{вл}$ слабо меняется в отличие от $Q_{сух}$ с изменением скорости воздуха. Радиационная составляющая пренебрежимо мала. В работе установлена взаимосвязь между коэф-

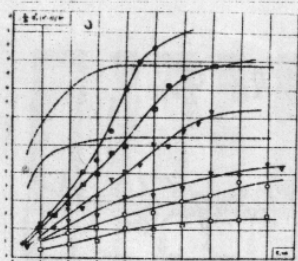


Рис. 10. Тепловое сопротивление инея в каналах ПСВО

Таблица I

Усредненные по сериям параметры воздуха на входе в ПСВО

Серия	Обозначен.	$t_{\text{воздуха}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{стенки}}, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \%$	Скорость воздуха, м/с
I	*	8	-6	56	1,47
2	●	8	-6	63	2,23
3	▽	11	-14	75	4,16
4	▽	13	-5	63	3,10
5	□	5	-20	50	2,39
6	●	4	-19	56	4,81
7	●	4	-18	50	1,93
8	○	6	-14	68	1,93
9	●	11	-14	74	2,41
10	■	15	-20	76	2,33
II	■	6	-13	85	2,45
12	▽	7	-17	81	2,9
13	●	11	-19	95	3,29

Причин отклонения от аналогии может быть несколько. Как показал анализ работ по тепло- и массообмену при инеобразованием в зависимости от условий инеобразования и геометрии поверхности могут иметь место отклонения как в сторону $Le > 1$, так и в сторону

Уравнение (13) описывает опытные данные с точностью $\pm 10\%$. Экспериментальные данные по приведенному коэффициенту теплоотдачи

$$\alpha_{пр} = \frac{\alpha_H \xi}{1 + \alpha_H \xi R_{и}}$$

обобщаются с точностью $\pm 22\%$ критериальной зависимостью (рис. 11)

$$Nu = 0,062 Re^{0,78} \quad (14)$$

а массоотдачи с точностью $\pm 18\%$ зависимостью (рис. 12)

$$Sh = 0,046 Re^{0,78} \quad (15)$$

Из (14) и (15) очевидно несоблюдение аналогии между тепло- и массообменом при инеобразовании в каналах ПСВО. Приведенное на рис. 5 сравнение критериев Nu и Sh для случая ПСВО показывает, что теплообмен примерно на 34,5% превышает массообмен. На рис. 13 приведены результаты проверки соблюдения аналогии между тепло- и массообменом при инеобразовании на профильных поверхностях ПСВО. Для сравнения взяты соотношения Льюиса и Чилтона-Колбурна (16), (17). Видно, что аналогия нарушается в сторону теплообмена

$$\frac{\alpha}{\beta C_p} = \frac{\alpha}{D} \quad \text{Льюиса} \quad (16)$$

$$\frac{\alpha}{\beta C_p} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad \text{Чилтон и Колбурн} \quad (17)$$

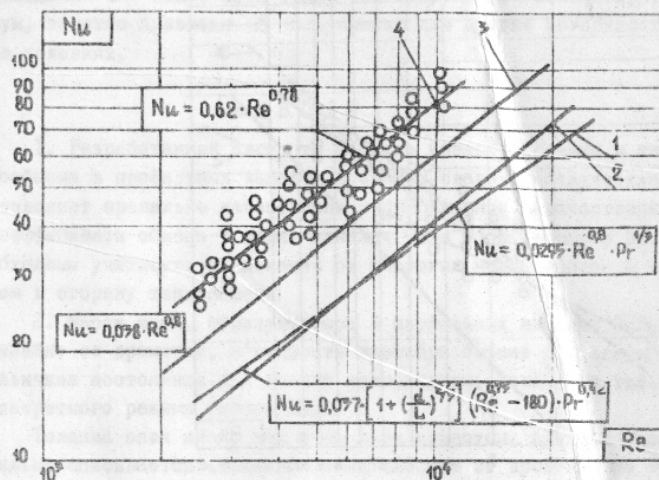


Рис. 11. Обобщение экспериментальных данных по теплообмену в ПСВО и их сравнение с данными других авторов: 1 - при течении в каналах и трубах (по Гаузену), 2 - при обтекании плоской пластины (по Петухову Б.С.), 3 - при обтекании плоского ребра (по Явие-лю Б.К.), 4 - настоящая работа $Nu = 0,062 Re^{0,78}$

$Le < 1$. При этом в случае $Le > 1$ численные значения Le колеблются от $Le = 1,135$ до $Le = 1,38$. Определяющим по мнению Ямакавы и Такахаши в этом случае является влияние десублимации в пограничном слое вследствие перегрева некоторых частиц инея относительно равновесной температуры в пограничном слое. Этот возможный перегрев в свою очередь определяется структурой инея (его теплопроводностью и плотностью) и гидродинамикой течения. И то и другое, как свидетельствует расчет и эксперимент по $\alpha_{и}$ и $\beta_{и}$ может иметь место в рассматриваемом случае.

Приведенный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{пр}$, учитывающий массоотдачу качественно ведет себя так же, как во всех известных на сегодня работах - проходит через максимум и плавно снижается вплоть до почти "постоянного" значения. Однако в ПСВО $\alpha_{пр}$ продолжает

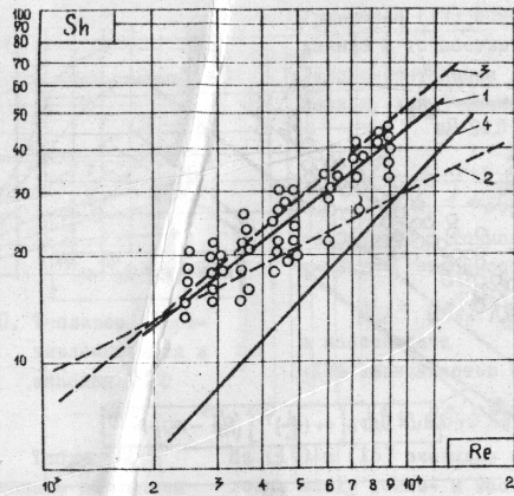


Рис. 12. Обобщение экспериментальных данных по массообмену при инееобразовании в ПСВО и их сравнение с данными других авторов: 1 - профильный канал (настоящая работа) $Sh = 0,046 Re^{0,78}$, 2 - плоская пластина (Явнель Б.К.), 3 - параллельные пластины (Ямада), 4 - трубы и каналы (пересчет при $Le = 1$)

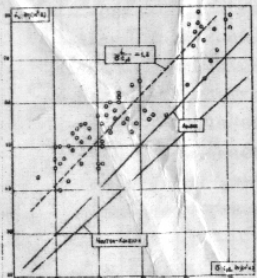


Рис. 13. Аналогия между тепло- и массообменом при инееобразовании в каналах ПСВО

расти в течении примерно 4...5 часов (вместо ~ 1 часа, как установлено во всех остальных случаях), т.е. практически до начала оттайки, что позволяет сохранить высокие значения $L_{пр}$ в течение всего процесса охлаждения; в 2,5...3 раза больше, чем обычно несмотря на меньшую (иногда ~ 3 раза) скорость потока. Но и при достижении "постоянного" значения $L_{пр}$ в 1,5...2 раза выше обычных. Максимальное значение $L_{пр}$ достигается при толщине слоя инея $\delta_{и} = 1...1,5$ мм. Коэффициенты мас-

соотдачи β ведут себя также, как $L_{пр}$, т.е. проходят через максимум, заметно превышая β полученные для других поверхностей в тех же условиях.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный алгоритм расчета инееобразования и теплообмена в профильных каналах прокатно-сварных воздухоохладителей позволяет правильно качественно и приближенно количественно оценить коэффициенты обмена в таких каналах. Для более точного расчета необходимо учитывать отклонения от аналогии между тепло- и массообменом в сторону теплообмена.

2. Масса инея, образующегося в профильных каналах ПСВО растет линейно со временем, а скорость инееобразования $G'_{и}$ кг/(м²·с) есть величина постоянная для данной поверхности, зависящая только от конкретного режима работы ПСВО.

Толщина слоя инея, как и во всех известных случаях удовлетворительно описывается степенной зависимостью от времени, но не подчиняется "закону квадратного корня". На рост толщины слоя инея превалирующее влияние оказывает относительная влажность воздуха и температура поверхности стенки. Скорость потока влияет в меньшей степени и при температурных напорах более 30°C процесс роста толщины инея становится автомодельным относительно скорости потока.

3. Плотность $\rho_{и}$ и теплопроводность $\lambda_{и}$ для ПСВО существенно выше обычных значений. Значения $\rho_{и}$ и $\lambda_{и}$ удовлетворительно описываются эмпирическими зависимостями, полученными в работе, а значения $\rho_{и}$ обобщаются в критериальном виде методом Токуры, Сайте и Кишинами с точностью ±17%.

4. Тепловое сопротивление слоя инея $R_{и} = \delta_{и}/\lambda_{и}$ для ПСВО также, как и для случая обретенных поверхностей увеличивается со временем по степенному закону, показатель степени которого зависит от скорости инееобразования.

5. Для ПСВО оптимальная по КПД аппарата толщина слоя инея до начала оттайки составляет ~ 3 мм, плотность теплового потока на оттаивание - 0,6...0,8 кВт/м², продолжительность цикла охлаждения - 8...10 часов при $0,7 < \varphi \leq 0,85$, что определяет частоту оттаивания ~ 3 раза в сутки. При $\varphi \leq 0,7$ оптимальна по КПД аппарата продолжительность цикла охлаждения составляет ~ 12 часов и более, что определяет частоту оттаивания ~ 2 раза в сутки.

6. Приведенный коэффициент теплоотдачи $L_{пр}$ для ПСВО в отличие от других поверхностей увеличивается со временем и достигает

максимума не в течении ~ I часа от начала процесса как обычно, а через 4...5 часов, т.е. практически вплоть до начала оттайки. Это позволяет сохранить высокие значения α_{np} в 2,5 ... 3 раза выше чем в других случаях в течение всего процесса охлаждения. Максимальное значение α_{np} достигается при $\delta_u = 1...1,5$ мм.

Значения коэффициентов массообмена β качественно ведут себя со временем также, как и α_{np} , но для ПСВО они существенно выше обычных.

7. Экспериментальные данные по тепло- и массообмену для ПСВО удовлетворительно обобщаются по полученным в диссертации критериальным зависимостям с точностью $\pm 22\%$ для теплообмена и $\pm 18\%$ для массообмена.

Аналогия между тепло- и массообменом при инееобразовании в ПСВО нарушается в сторону теплообмена ($L\beta = 1,2$). Число Льюиса слабо меняется со временем, но сильно зависит от скорости инееобразования, проходя через максимум при $g'_u = 40...50$ кг/(м²·с).

8. Полученные в работе теоретические и экспериментальные данные по инееобразованию, тепломассообмену и временным циклам охлаждения и оттайки ПСВО показали перспективность применения прокатно-сварных поверхностей для создания высокоэффективных воздухоохладителей неветго типа. Эти данные позволяют проводить расчеты и конструирование таких аппаратов и могут быть рекомендованы к практическому использованию в инженерной практике.

ПУБЛИКАЦИИ

1. Петриман В.Ф., Никульшин Р.К., Козлова М.В., Абдул Шакур Хан Прокатно-сварной конденсатор воздушного охлаждения // Сб. Холодильная техника и технология, 1985. - Вып. 40. - С. 3-6.
2. Абдул Шакур Хан, Никульшин Р.К., Козлова М.В., Речицкая Е.В. Экспериментальное исследование тепломассообмена в прокатно-сварных испарителях в условия: вынужденного движения воздуха // Сб. Холодильная техника и технология, 1988. - Вып. 47 (в печати).

ОБОЗНАЧЕНИЯ

B, A_1, A_2, A_3 - константы; U, V - компоненты скорости; $l_{1,2}$ - длина пути перемешивания; P - давление; ρ - плотность; M - вязкость; T - температура; остальное - в тексте.

Шакур