

Авторец
А18

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

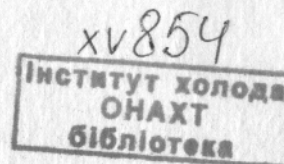
АВДЕЕВ ЕВГЕНИЙ СТЕПАНОВИЧ

ПАНЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТРЕМОВ
РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ ДОБЫВАЮЩИХ И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СУДОВ

(Исследование, разработка, внедрение)

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

А.А.А.



ДИССЕРТАЦИЯ

в форме научного доклада
на соискание ученой степени доктора технических наук

Одесса – 1992

Работа выполнена в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики

Официальные оппоненты:

- ВОЙТКО Андрей Маркович - доктор технических наук, профессор Одесского института низкотемпературной техники и энергетики;
- ЗАГОРУЖКО Василий Анисимович - доктор технических наук, профессор Одесского института инженеров морского флота;
- ИОНОВ Алексей Григорьевич - доктор технических наук, профессор Калининградского технического института рыбной промышленности и хозяйства

Ведущая организация: Южный Государственный исследовательский и проектно-конструкторский институт по развитию и эксплуатации флота рыбной промышленности.

Защита состоится "30" марта 1992 г. в 11 часов на заседании Специализированного совета Д.063.27.01 при Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики по адресу: 270100, г. Одесса, ул. Петра Великого, 1/3

Научный доклад разослан "17" февраля 1992 г.

СЕКРЕТАРЬ
НАУЧНОГО СОВЕТА
цент

Р.К.НИКОЛЬШИН

4-03-890

92

ВЫДАЧА

- 3 -

В диссертации, представленной в форме научного доклада, изложены результаты восемнадцатилетних исследований, выполненных автором в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики. Работа направлена на решение задач по сокращению потерь и повышению качества продуктов, рациональному использованию сырьевых, топливно-энергетических и других материальных ресурсов, внедрению в промышленность перспективных способов охлаждения и хранения рыбы и рыбопродукции, эффективному использованию флота рыбной промышленности.

Автор диссертации является непосредственным исполнителем и научным руководителем работ, основные результаты которых представлены в 25 отчетах по НИР, 67 публикациях и двух докладах на Научно-технических советах Минрыбхоза СССР.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Принятые в диссертации сокращения и условные обозначения приведены на стр. 47.

Актуальность. Высокие качественные показатели вырабатываемой и транспортируемой мороженой рыбопродукции являются ближайшим и крупным резервом повышения эффективности производства.

Главная роль в решении задач рыбной промышленности отводится рыбопромысловому рефрижераторному флоту, развитие которого идет и будет идти по пути использования энергосберегающих технических средств и технологий. Основное место принадлежит добывающим и обрабатывающим судам, которые по численности и грузоемкости рефрижераторных трюмов достигают более 60% состава этого флота. Рефрижераторные трюмы таких судов оснащены ВСО и другими СРНТ, тепловлажностные режимы которых не в полной мере отвечают требованиям холодиль-

ной технологии, а их технико-экономические и эксплуатационные показатели недостаточно высоки. Проблемы, связанные с повышением качества хранения свежемороженой рыбопродукции, экономным и рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов, улучшением технико-экономических характеристик рыбопромысловых судов могут быть в известной мере решены применением различных модификаций систем внекамерного панельного охлаждения. Эти системы не имели аналога в практике отечественного и зарубежного судостроения и поэтому нуждались в проведении всесторонних исследований. Таким образом, задача повышения эффективности эксплуатации добывающих и обрабатывающих рыбопромысловых судов путем создания для них указанных систем представляет собой теоретический и практический интерес.

Цель работы. Создание научных основ разработки и проектирования СРНТ, использующих принцип внекамерного панельного охлаждения и удовлетворяющих требованиям холодильной и энергосберегающей технологий, проведение экспериментальных и технико-экономических исследований, внедрение этих систем совместно с промышленными организациями и предприятиями на добывающих и обрабатывающих рыбопромысловых судах.

Научная новизна: а) для новых СРНТ, использующих принцип внекамерного панельного охлаждения, разработаны математические модели и теоретические зависимости стационарных и нестационарных тепломассообменных процессов для штабеля груза и теплопередающих элементов приборов охлаждения, созданы методы расчета; - экспериментально установлены закономерности внешнего теплообмена приборов охлаждения в сухих и влажных режимах и термогидравлических процессов при вынужденном движении и кипении двухфазного R_{22} в горизонтальных трубах панельных батарей; б) экспериментально установлены закономерности формирования температурно-влажностных полей в трюмах, оборудованных ПСО и другими СРНТ, на общей методической основе результаты этих исследований сопоставлены и обобщены; в) разработан метод ком-

плексного, системного сравнительного анализа СРНТ, с помощью которого получены новые данные, установлено влияние типа СРНТ на технические характеристики рефрижераторного судна, как сложного инженерного сооружения.

Практическая ценность. Результаты научных исследований использованы: ЦБ "Черноморсудопроект" (г. Николаев), ЦБ "Восток" (г. Ленинград), судостроительными заводами "Океан", "Черноморский" (г. Николаев), "Ленинская кузница" (г. Киев), Ленинградским Адмиралтейским объединением, Управлением Мурманского тралового флота, ЦКНТБ "Севрыба" (г. Мурманск), ЦКНТБ "Азичеррыба" (г. Севастополь), Эстонским производственным судоремонтным объединением "Остремрьбфлот" (г. Таллин) при создании и совершенствовании новых систем внекамерного панельного охлаждения на судах флота рыбной промышленности; в учебниках, учебных и справочных пособиях, в курсах лекций, в научных разработках, при курсовом и дипломном проектировании.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены в докладах на XIII и XIV Международных конгрессах по холоду (1971 г., США, г. Вашингтон; 1975 г., г. Москва), на заседании комиссии ДЗ.В2 Международного института холода (1974 г., Япония, г. Токио), на Международных научно-технических конференциях (1976 г., ГДР, г. Берлин; 1977 г. БНР, г. Пловдив), на VI научно-технической конференции по развитию флота рыбной промышленности и промышленного рыболовства социалистических стран (1984 г., г. Ленинград), на Всесоюзных конференциях (1984 г., г. Калининград; 1985 г., г. Севастополь), на научно-технических Советах Минрыбхоза СССР (1976 и 1980 гг., г. Москва), на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников ОТИХП (г. Одесса).

Публикации. Основное содержание доклада опубликовано в 67 печатных работах: в монографии "Панельные системы охлаждения рефрижераторных

судов", в журналах "Холодильная техника", "Рыбное хозяйство", "Судостроение", "Автоматическая сварка", в сборнике "Холодильная техника и технология", в материалах научных конгрессов, конференций, семинаров, в бюллетенях изобретений.

Структура и объем научного доклада. Доклад состоит из введения, шести разделов, выводов, списка основных публикаций и приложений. Доклад изложен на 47 страницах и содержит 28 рисунков.

В В Е Д Е Н И Е

Особенность развития рыбного хозяйства СССР в последние годы состоит в том, что основной прирост добычи рыбы происходит за счет интенсификации океанического рыболовства в удаленных районах промысла и перехода на глубоководный лов. Вследствие этого, а также из-за снижения численности популяций промысловых рыб увеличиваются автономность плавания рыбопромыслового судна и продолжительность хранения в его трюмах мороженой рыбопродукции, возрастают затраты энергии на работу главных, промысловых и вспомогательных механизмов, в том числе - и на холодильную установку, повышаются расходы топлива и увеличиваются его запасы. В конечном итоге все это приводит к ухудшению использования водоизмещения судна, повышению себестоимости и потребительской ценности вырабатываемой на судне рыбопродукции. Такая особенность в развитии рыбного хозяйства, наряду с возрастающими затратами на жидкое топливо, требует экономного расходования энергоресурсов и максимальной сохранности свежемороженой рыбопродукции. Таким образом, создание СРНТ, удовлетворяющей требованиям холодильной и энергосберегающей технологий, является одним из путей повышения эффективности работы флота рыбной промышленности и относится к проблемам, требующим для своего решения системного подхода.

Исследования С.Г.Чуклина, А.Г.Ионова, Л.И.Константинова, В.В.Захарова, В.В.Стефановича, Б.В.Комарницкого, В.И.Карева, Г.К.Цвиговского, Д.Г.Никульшиной, И.А.Баландина, Н.В.Бомина, А.О.Серажутдинова и

других посвящены отдельным элементам судовых холодильных установок. Необходимо было обобщить разрозненные сведения по различным СРНТ, осуществить широкое комплексное их исследование, определить влияние типа СРНТ на технические показатели судна, как сложного инженерного сооружения, в совокупности с результатами исследований новых СРНТ, которые разрабатывались при непосредственном участии и под руководством автора настоящей работы.

В диссертации отражены результаты исследований различных модификаций систем внекамерного панельного охлаждения, которые начались с разработки авторского предложения (А.с. № 162762, 282353, 559076, 732632, 1086335), создания научных основ проектирования таких систем, проведения лабораторных и натурных исследований и завершены широким серийным внедрением. Одновременно в диссертации намечены пути дальнейшего совершенствования этих СРНТ с использованием высокоэффективных приборов охлаждения, изготавливаемых из алюминиевых сплавов с применением новых технологий.

Научные положения, защищаемые в работе:

1. Научные основы разработки и проектирования СРНТ, использующих принцип внекамерного панельного охлаждения, позволяют осуществлять их проектирование, устанавливать основные тепло- и массообменные параметры, определять рациональные геометрические характеристики сложных теплопередающих элементов этих систем для заданных условий эксплуатации, производить их сравнительный анализ с другими СРНТ и прогнозировать тепло- и массообменные процессы, протекающие в штабеле груза.

2. Закономерности теплообмена приборов охлаждения ПСО со стороны трюма состоят в том, что конвективный теплообмен пластины волнообразного профиля с переменной температурной в сравнении с плоской изотермической пластиной более интенсивный, отвод внутритрюмных теплопритоков осуществляется преимущественно лучистым путем, а приведенный коэффициент теплоотдачи мало зависит от плотности теплового потока; - повышение эффективности работы ПСО достигается, главным образом,

максимальным экранированием наружных ограждений и развитием теплообменной поверхности приборов охлаждения со стороны трюма.

3. Теплофизическая обстановка в рефрижераторных трюмах, оборудованных ПСО, в сравнении с другими СРНТ в максимальной степени соответствует современным требованиям холодильной технологии и гарантирует наивысшее качество хранения мороженных грузов.

4. Метод системной оценки СРНТ при одинаковых полезных грузовместимостях трюмов адекватно отражает истинные показатели СРНТ; - реализация метода приводит к более совершенным техническим характеристикам вновь проектируемых судов, трюмы которых оборудованы ПСО, а дальнейшее повышение их эффективности достигается применением модифицированных вариантов этих систем.

1. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ВНЕКАМЕРНОГО ПАНЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

ПСО - разновидность системы внекамерного охлаждения. Судовая ПСО была предложена и описана в /1,4,6,9,39,40,41,42,45,66/, а ее схема показана на рис.1. Панельные батареи экранируют значительную часть наружных ограждений, со стороны которых внешние теплопритоки не проникают внутрь трюма. Дополнительное термическое сопротивление воздушной прослойки и развитая поверхность ПСО со стороны трюма способствуют сокращению внешних теплопритоков, уменьшению разности температур между воздухом в трюме и охлаждающей средой и, в конечном итоге, - уменьшению энергозатрат.

В стационарном режиме основные тепло- и массообменные параметры (температуры воздуха в трюме и груза, потерю массы груза от усушки) можно определить из совместного решения балансовых уравнений. Рефрижераторный трюм представляет собой сложную систему, состоящую из нескольких подсистем: наружных ограждений, штабеля груза, приборов охлаждения и воздуха в трюме. Схема тепловых потоков изображена на рис.2.

Тепловой баланс каждой подсистемы можно представить в виде $\sum Q_{i,j}^m - Q_{i,j}^n$ (i, j - подсистемы, обменивающиеся между собой теплотой и влагой; m - вид теплообмена: конвективный, лучистый, влажный; $Q_{i,j}^n$ - теплота, аккумулируемая рассматриваемой подсистемой. Тепловые потоки в левых и правых частях этой системы определяются по известным зависимостям теплопередачи.

Непосредственной причиной, вызывающей усушку, является теплота сублимации влаги с поверхности продукта $Q_{п-з}^b$ или десублимации инея на поверхности приборов охлаждения $Q_{з-б}^b$ и тогда $\Delta G = Q_{i,j}^b / (\tau_0 - i_w)_{i,j}$. Нетрудно заметить, что $(Q_{п-з}^b)_{псо} < (Q_{п-з}^b)_{всо}$, так как $(Q_{п-з}^b)_{псо} = Q_{п-з}^k + Q_{см-п}^A + Q_{п-б}^A - Q_{п-б}^A$; $(Q_{п-з}^b)_{всо} = Q_{п-з}^k + Q_{о-п}^A + Q_{п-б}^A$. Из рис.2 видно, что $Q_{о-п}^A < Q_{о-п}^A$, а часть теплового потока $(Q_{п-б}^A)_{псо}$ отводится лучистым путем, в то время, как $(Q_{п-б}^A)_{всо} = 0$. Такая теплофизическая обстановка является почти идеальной с точки зрения требований холодильной технологии к хранению мороженных грузов, а основные положения, изложенные выше, подтверждаются теоретическими и экспериментальными данными по динамике осадения инея на теплопередающей поверхности приборов охлаждения /13,42,51,52,54,56,59/ и количественными соотношениями между различными составляющими теплопритоков ПСО и ВСО /25,26/. Аналогичные тепломассообменные параметры в нестационарном режиме могут быть определены на основании законов сохранения энергии и массы /32/. Физическая модель процессов тепло- и массообмена, изображенная на рис.3, представляет собой упорядоченный плотный слой картонных ящиков с мороженной рыбопродукцией, сформированных в штабель, который располагается в изолированной охлаждаемой камере. Штабель состоит из двух компонентов: твердого и газообразного, каждый из которых рассматривается как квазигомогенная среда, характеризующаяся эффективными коэффициентами теплопроводности и диффузии, а также межкомпонентными коэффициентами тепло- и массообмена. При построении физической модели приняты допущения о том, что теплофизические константы воздуха и продукта, коэффициенты межкомпонентного тепло- и массообмена в штабеле и на его границах

постоянны и не зависят от температур.

Математическая формулировка процессов нестационарного тепло-и массопереноса базируется на законе сохранения энергии сплошной среды и описывается системой дифференциальных уравнений для твердого и газового компонентов внутри штабеля и на его боковых границах:

$$(1-\varepsilon)\rho_t c_t \frac{\partial t_t}{\partial \tau} - \lambda_{zt} \frac{\partial^2 t_t}{\partial x^2} - \lambda_{yt} \frac{\partial^2 t_t}{\partial y^2} + \alpha_t f_v(t_t - t_g) + \beta f_v \Delta P(t_t, d_t) - \sum f_{vi} q_i = 0 \quad (1)$$

$$\varepsilon \rho_g c_g \frac{\partial t_g}{\partial \tau} - \lambda_{zg} \frac{\partial^2 t_g}{\partial x^2} - \lambda_{yg} \frac{\partial^2 t_g}{\partial y^2} + (\rho \omega)_g c_g \frac{\partial t_g}{\partial y} - \alpha_t f_v(t_t - t_g) - \sum f_{vi} q_i = 0 \quad (2)$$

$$\rho_b c_b L_k \frac{\partial t_b}{\partial \tau} + (\rho_b \omega_k) c_b L_k \frac{\partial t_b}{\partial y} - \alpha_k(t_t - t_{bk}) - \sum q_i = 0 \quad (3)$$

Здесь: $\sum f_{vi} q_i = f_{vg} q_g^y - f_{vn} q_n^y - f_{vs} q_s^z$; $\sum q_i = q_g^y - q_n^y - q_s^z$.

Закон сохранения массы газового компонента представим дифференциальным уравнением вида:

$$\varepsilon \rho_g \frac{\partial d_t}{\partial \tau} - \rho_g D_{zg} \frac{\partial^2 d_t}{\partial x^2} - \rho_g D_{yg} \frac{\partial^2 d_t}{\partial y^2} - (\rho \omega)_g \frac{\partial d_t}{\partial y} - \beta f_v \Delta P(t_t, d_t) = 0 \quad (4)$$

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$\tau=0; t_t=t_{t0}; t_g=t_{g0}; d_t=d_{t0}; t_{bk}=t_{b0}; d_{bk}=d_{b0};$$

$$y=0; 0 \leq x \leq L; \frac{\partial t_t}{\partial y}=0; t_g=t_{g0}; \frac{\partial d_t}{\partial y}=0; t_{bk}=t_{b0}; d_{bk}=d_{b0};$$

$$y=H; 0 \leq x \leq L; -\lambda_{yt} \frac{\partial t_t}{\partial y} = \alpha_t f_v(t_t - t_g); \frac{\partial t_g}{\partial y}=0; \frac{\partial d_t}{\partial y}=0;$$

$$x=0; 0 \leq y \leq H; \frac{\partial t_t}{\partial x}=0; \frac{\partial t_g}{\partial x}=0; \frac{\partial d_t}{\partial x}=0;$$

$$x=L; 0 \leq y \leq H; -\lambda_{xt} \frac{\partial t_t}{\partial x} = \alpha_k f_v(t_t - t_{bk}); -\lambda_{xg} \frac{\partial t_g}{\partial x} = \alpha_k f_v(t_{t/L} - t_{bk});$$

$$-D_{xg} \frac{\partial d_t}{\partial x} = \beta f_v \Delta P(t_t, d_t).$$

Предложенная система нестационарных дифференциальных уравнений I и II порядков в частных производных с граничными условиями I и III рода является приближенной моделью сложных тепло-и массообменных процессов, реально протекающих в штабеле мороженой рыбопродукции. Система уравнений решается численным методом конечных разностей и проводится по неявной схеме, которая является абсолютно устойчивой при любом соотношении временных и пространственных шагов. Уравнения решаются методом прогонки по программе, составленной для ЭВМ серии ЕС, для чего систему четырех дифференциальных уравнений (1-4) представим в

виде одного обобщенного двумерного нестационарного параболического уравнения с постоянными коэффициентами

$$e \frac{\partial u}{\partial \tau} = K_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K_3 \frac{\partial u}{\partial y} - qu + f(x, y, \tau). \quad (5)$$

Для удобства программирования уравнение (5) запишем в виде системы двух уравнений с соответствующими граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} e \frac{\partial u}{\partial \tau} &= K_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{2} qu + \frac{1}{2} f(x, \tau) \\ x=0; \omega_n + \rho_n \frac{\partial u}{\partial x} &= \psi_n \\ x=L; \omega_{12} + \rho_{12} \frac{\partial u}{\partial x} &= \psi_{12} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} e \frac{\partial u}{\partial \tau} &= K_2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K_3 \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{2} qu + \frac{1}{2} f(y, \tau) \\ y=0; \omega_{21} + \rho_{21} \frac{\partial u}{\partial y} &= \psi_{21} \\ y=H; \omega_{22} + \rho_{22} \frac{\partial u}{\partial y} &= \psi_{22} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Если в уравнениях (6 и 7) фиксировать x и y , то они превратятся в одномерные уравнения. В этих уравнениях и в модифицированных граничных условиях $e, K_1, \omega_{ij}, \rho_{ij}$ представляют собой комплекс, составленный из соответствующих тепло-массообменных и теплофизических величин, а $f(x, y, \tau)$ - свободные члены, функционально зависящие от координат и времени. Перечисленные параметры определяются из (1-4) и могут принимать действительные значения, а также быть равными 0 или 1.

Распределение температур и тепловых потоков на элементе панели - ной батареи (рис. 4 и 5) получено из совместного решения элементарных тепловых балансов для участков 4', 4'' и 5. Так, для элементарного участка dx имеем:

$$Q_x + dQ_{2-5} + dQ_{3-5} = Q_{x+dx}. \quad (8)$$

Здесь: $Q_x = -\lambda_t \delta_t \frac{dt_{tx}}{dx}$; $Q_{x+dx} = Q_x + \frac{dQ_x}{dx} dx$; $Q_{i-j} = \alpha_{i-j} (t_i - t_j) dx$.

Уравнение (8), как и уравнения элементарных тепловых балансов для участков 4' и 4'', приводятся к виду $\frac{d^2 t_{ix}}{dx^2} - a_i t_{ix} = -b_i$, общее решение которого $t_{ix} = C_1 e^{\sqrt{a_i} x} + C_2 e^{-\sqrt{a_i} x} + (b/a)_i$. Частное решение находим из граничных условий: $(Q_x)_{x=0} = 0$; $(Q_y)_{y=0} = 0$; $(Q_z)_{z=0} = 0$;

$(t_{5x})_x = t_{5y} = t_{5z} = t_{5-4}$ и тогда

$$t_{5x} = [t_{5-4} - (t_{3-2})_{np}] \operatorname{ch} \sqrt{a_5} x / \operatorname{ch} \sqrt{a_5} l_5 + (t_{3-2})_{np}$$

Аналогично для участков 4' и 4''

$$t_{4'y} = [t_{5-4} - (t_{1-2})_{np}] \operatorname{ch} \sqrt{a_4} y / \operatorname{ch} \sqrt{a_4} l_4 + (t_{1-2})_{np}$$

$$t_{4'z} = [t_{5-4} - (t_{1-3})_{np}] \operatorname{ch} \sqrt{a_4} z / \operatorname{ch} \sqrt{a_4} l_4 + (t_{1-3})_{np}$$

Теплосъем участков 5, 4' и 4''

$$(Q_{5x})_{x=l_5} = -[t_{5-4} - (t_{3-2})_{np}] \lambda_5 \delta_5 \operatorname{th} \sqrt{a_5} l_5$$

$$(Q_{4'y})_{y=l_4} = -[t_{5-4} - (t_{1-2})_{np}] \lambda_4 \delta_4 \operatorname{th} \sqrt{a_4} l_4$$

$$(Q_{4'z})_{z=l_4} = -[t_{5-4} - (t_{1-3})_{np}] \lambda_4 \delta_4 \operatorname{th} \sqrt{a_4} l_4$$

Общий теплосъем элемента $Q_{0,1} = (Q_{5x})_{x=l_5} + (Q_{4'y})_{y=l_4} + (Q_{4'z})_{z=l_4}$

Температура у основания ребра t_{5-4} определяется из условия

$$(Q_{5x})_{x=l_5} - (Q_{4'y})_{y=l_4} - (Q_{4'z})_{z=l_4} = 0$$

В этих зависимостях: $a_5 = (\alpha_{2-5} + \alpha_{3-5}) / \lambda_5 \delta_5$; $a_4 = (\alpha_{2-4} + \alpha_{1-4}) / \lambda_4 \delta_4$;

$$a_{4''} = (\alpha_{3-4''} + \alpha_{1-4''}) / \lambda_4 \delta_4$$

$$(t_{3-2})_{np} = (\alpha_{2-5} t_2 + \alpha_{3-5} t_3) / (\alpha_{2-5} + \alpha_{3-5})$$

$$(t_{1-2})_{np} = (\alpha_{2-4} t_2 + \alpha_{1-4} t_1) / (\alpha_{2-4} + \alpha_{1-4})$$

$$(t_{1-3})_{np} = (\alpha_{3-4} t_3 + \alpha_{1-4} t_1) / (\alpha_{3-4} + \alpha_{1-4})$$

После преобразований определяем равновесные температуры охлаждающей среды и воздуха в простойке

$$t_{0,1} = \frac{t_3[(d+n+p_k)D - (k+e-v)(d-g) - t_{n,1}P_{np}(d-g) - t_{n,1}P_kD - q_3S_kD]}{(T+v)(d-g) + (g+n)D} \quad (9)$$

$$t_2 = [t_3(k+e-v) + t_{n,1}P_{np} + t_{0,1}(T+v)] / D \quad (10)$$

Параметры, входящие в формулы (9,10), приведены в монографии /40/.

На основе приведенных теоретических зависимостей разработаны теоретические и графические методы расчета ПСО /2,3,21/. Метод, изложенный в /21/, основан на совместном решении балансовых уравнений для наружной и внутренней сторон панельной батареи с учетом теплового влияния всех конструктивных элементов /8/

$$Q_3 = \alpha_3 F_{3T} (t_3 - t_1) + \sum_{i=1}^n [\alpha_3 F_3 (t_3 - t_i) E]_i; \quad Q_2 = \alpha_2 F_{2T} (t_2 - t_1) + \sum_{i=1}^n [\alpha_2 F_2 (t_2 - t_i) E]_i$$

После преобразований получаем выражение для равновесной температуры ох-

лаждающей среды

$$t_{0,1} = t_3 - Q_3 / \alpha_3 F_{3T} - Q_1 / \alpha_1 F_{1T} \quad (11)$$

Подробно метод расчета, все входящие в него параметры приведены в работе /21/, на основании которой разработаны алгоритм и программа на языке ФОРТРАН для ЭЕМ серии ЕС по выбору рациональных геометрических размеров теплопередающего элемента панельной батареи (П.20). Анализ уравнения (11) показывает, что $Q_3 / \alpha_3 F_{3T} > Q_1 / \alpha_1 F_{1T}$, поэтому для повышения энергетической эффективности необходимо принимать меры, приводящие главным образом к уменьшению величины второго слагаемого в правой части уравнения (11).

ПБСО - разновидность системы внекамерного охлаждения с универсальным режимом работы. Одним из способов уменьшения отношения $Q_3 / \alpha_3 F_{3T}$ является использование в конструкции теплопередающего элемента батареи ПСО двух плавниковых ребер вместо одного и осуществление вынужденного движения воздуха между ними, что приведет к возрастанию F_3 и α_3 и некоторому уменьшению E_{3np} . Эта идея реализована в ПБСО /47/, которая может работать в режимах панельного и панельно-воздушного охлаждения. Схема ПБСО и ее теплопередающий элемент изображены на рис.6 и 7.

Распределение температур на участках 5,6,7,7',7'' теплопередающего элемента и теплосъем этих участков получены из совместного решения уравнений тепловых балансов. Так, для элементарного участка dx на ребре 5 имеем

$$Q_x + dQ_{2-5} + dQ_{1-5} = Q_{x+dx} \quad (12)$$

Тепловые потоки Q_1 и Q_{1-5} в уравнении (12) и его общее и частное решения при граничных условиях $(Q_x)_{x=0} = 0$; $(Q_{1-5})_{1=0} = 0$; $(t_{5x})_{x=l_5} = (t_{1y})_{y=l_1} = t_{5-7}$; $(t_{6x})_{x=l_6} = (t_{1y})_{y=l_1} = t_{6-7}$ находятся аналогично уравнению (8). Таким же путем решаются дифференциальные уравнения для участков 7, 7' и 7''. После преобразований находим температуру хладагента (хладоносителя) и теплосъем элемента:

$$t_{0,1} = [(t_{2-0})_{np} (k_1 \alpha_0 + k_2 \alpha_2) - k_2 \alpha_2 t_2] / k_1 \alpha_0 \quad (13)$$

$$Q_0 = [t_n - (1 - E_6)(t_2 - t_n)_{np} - E_6 t_{6-7}] / \alpha_{зпр} h_p 2L. \quad (14)$$

Подробно закономерности теплопередачи ПВСО изложены в работе /53/, на основании которой разработаны методы расчета в режимах панельного /55/ и панельно-воздушного /5/ охлаждения.

Осаждение инея на теплообменных элементах батареи ПВСО со стороны воздушной прослойки может нарушить работу системы, поэтому теоретически определена предельно возможная толщина намороженного инея при заданных условиях теплообмена. При решении этой задачи использованы те же методы, что и при решении дифференциальных уравнений типа (8 и 12). Частные решения получены из общих с учетом граничных условий: $(Q_{ix})_{x=0} = 0$; $(\frac{dt_{6x}}{dx})_{x=0} = 0$; $(t_{6x})_{x=h_p} = t_{6-7}$; $(\frac{dt_{6x}}{dx})_{x=h_p} = 0$; $(t_{6x})_{x=h_p} = t_{6-7}$. $(t_{7y})_{y=0} = t_{6-7}$; $(t_{7y})_{y=l_p} = t_{6-7}$.

Совместное решение уравнений элементарных тепловых балансов с учетом граничных условий, равенства температур поверхности инея и точки росы дает искомую максимальную толщину слоя инея в рассматриваемом сечении, которая для ребра 5 составит

$$(\delta_x)_{i=5} = [\delta_u(t_{pi} - t_{6-7}) - 0,5A(h_p^2 - x_2^2)] / \alpha_i(t_i - t_{pi}) \quad (15)$$

где: $i = 1, 2$ - соответствующие воздушные среды.

Аналогичным образом определены $(\delta_x)_{2-6}$ и (δ_y) . Решение задачи о времени осаждения инея максимальной толщины на теплопередающей поверхности панелей отличается от ранее полученного С.Г.Чуклиным тем, что вместо средней величины коэффициента влаговыделения ξ_{cp} за продолжительный промежуток времени найдена функциональная зависимость $\xi_i = \xi_{max} - [c(\alpha_{max} + \lambda_u/\delta_{ux})] / [\lambda_u(t_i - t_n)/\delta_{ux} + c\alpha_k]$.

где: $\alpha_{max} = \alpha_k \xi_{max} + \alpha_n$; $\xi_{max} = 1 + B$; $B = f_1(t_i)$; $c = f_2(t_i, \varphi_i)$.

После подстановки значения ξ_i в дифференциальное уравнение С.Г.Чуклина и интегрирования в пределах $0 \leq \delta_{ux} \leq (\delta_u)_{max}$ получено новое уравнение для времени осаждения инея:

$$\tau = \frac{\rho_u \xi_i}{\alpha_k(\xi_{max} - 1)(t_i - t_p)} \left[\frac{\alpha_{max}(\delta_u)_{max} - \lambda_u}{\alpha_i} - \ln \frac{1}{1 - \delta_u/(\delta_u)_{max}} - \frac{\alpha_{max}\delta_u}{\alpha_i} \right] \quad (16)$$

Отличительная особенность этого уравнения состоит в том, что при $\tau \rightarrow \infty$, $\delta_u \rightarrow (\delta_u)_{max}$, в то время как при формальном использовании уравнения С.Г.Чуклина следует, что при $\tau \rightarrow \infty$, $\delta_u \rightarrow \infty$, что с теплофизической точки зрения противоречит условию $\delta_u \leq (\delta_u)_{max}$. Подробное решение задач по динамическим процессам инееобразования изложено в работах /17, 18/.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИБОРОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ПСО И ПВСО

Внешний теплообмен приборов охлаждения ПСО. Распределение температур на отдельных участках теплопередающего элемента показало хорошую сходимость экспериментальных данных с теоретическими зависимостями /8/.

На рис.9 изображена тепловая эффективность E_i отдельных конструктивных элементов батарей ПСО и доля тепловой нагрузки, отводимой ими, $\eta_i = (Q_p/Q_0)_i$, где: $Q_{pi} = \lambda f_i(t_{np} - t_0)_i m_i th(mh_p)_i = \lambda f_i(t_{np} - t_0)_i (m^2 h_p E)_i$.

Установлено, что обрешетник отводит 14...15% общей и 21...22% внутритрунной тепловой нагрузки, являясь интенсивным теплоотводящим элементом. В условиях инееобразования, при максимальной толщине слоя инея, эффективность плавникового ребра практически не изменялась, в то время как у обрешетника и концевых частей увеличилась на 7...13%.

На рис.10 показаны данные по теплообмену в сухом и влажном режимах. Коэффициенты теплоотдачи со стороны воздушных прослоек α_2 и со стороны трюма α_{zi} , $\alpha_{зпр}$, $\alpha_{зз}$ в явной форме аппроксимируются линейной зависимостью $\alpha_i = \alpha_0 + \beta_i q_i$. Коэффициенты теплоотдачи во влажных режимах отнесены к поверхности инея $\alpha_{зпр} = \alpha_{зк} \xi + \alpha_n$ и к поверхности панели $\alpha_{зз} = [1/(\alpha_{зк} + \delta_u/\lambda_u)] \xi + \alpha_n$.

Данные по теплоотдаче α_{zi} обобщены в виде $Nu = 0,204 Ra^{0,321}$ для бортовых и переборочных панелей и $Nu = 0,753 \cdot 10^{-2} Ra^{0,438}$ для подволочных панелей (рис.11). Среднее квадратичное расхождение этих зависимостей на 15...17% превышает значения, полученные по рекомендуемой в литературе $Nu = 0,135 Ra^{1/3}$.

Из рис.10 видно, что α_{zi} слабо зависит от q_{zi} и, таким об-

разом, повышение энергетической эффективности ПСО может быть реализовано, главным образом, за счет увеличения поверхности F_z . Подробно рассматриваемые вопросы освещены в работах /8,57,58/.

Используя экспериментальные данные по плотности тепловых потоков со стороны трюма, по сухому и влажному теплообмену, по температурному распределению на элементах поверхности батарей и по теплофизическим свойствам иней, теоретическим путем были определены лучистые, конвективные и влажные составляющие тепловых потоков в общем тепловом балансе. Полученные результаты изображены на рис.12, откуда видно преобладающее влияние лучистого теплового потока в общем тепловом балансе ПСО.

Дополнительно проведено исследование конструкции панельной батареи из стальных труб с плавниковыми ребрами и обрешетником из алюминиевых сплавов /34/, элемент которой изображен на рис.4-6. Описание конструкции, результатов теплотехнических и коррозионных испытаний такой батареи и различных ее элементов освещено в работах /29,33,33/. Экспериментами установлено, что контактное термическое сопротивление и скорость коррозии на границе стальной трубы и алюминиевой оболочки ничтожно малы.

Внутренний теплообмен приборов охлаждения ПСО. Исследования Г.Н.Даниловой, С.Н.Вогданова, В.А.Дюндина, В.М.Азарскова, В.А.Захарова, Н.И.Радченко, Б.Б.Земскова, А.Г.Ионова, Б.С.Слипцевича, Д.Хавлы, Бо-Пьерре и других посвящены процессам теплообмена и гидродинамики двухфазных потоков фреонов при параметрах либо не соответствующих работе судовых ПСО, либо при безнасосном способе подачи. В процессе предварительных испытаний холодильной установки на R 22, проведенных на ТР "Амурский Залив" /7/, определено влияние столба жидкости на теплопередачу.

Экспериментальные исследования термогидравлических процессов при вынужденном движении и кипении двухфазных потоков R 22 осуществлены на лабораторном стенде /10,23,36/. Установлены области существо-

вания различных режимов течения двухфазного потока для насосного способа подачи /20,60/ в диапазоне критериев $Re' = 800-5000$ и $Re'' = 1000-32000$ (рис.13) и закономерности изменения локальных и интегральных коэффициентов теплоотдачи /10,11,14,36/.

Так, в /10,36/ для диапазона температур кипения $-37...-46^\circ\text{C}$ установлена аналитическая зависимость $\alpha_o = Aq_o^{0,54}$, в которой $A = f(t_o)$

На теплообмен при кипении и вынужденном движении R 22 в горизонтальных трубах панельных батарей оказывают влияние, главным образом, интенсивность парообразования, скорость течения жидкого R 22, теплофизические свойства пара и жидкости, совокупность которых определяет вид критериального уравнения $Nu = f(Re_o, Re', We, Pr, \rho'/\rho'')$. Математическое планирование эксперимента показало, что критерий We для условий проведения эксперимента не оказывает практического влияния на теплообмен, в результате чего получено окончательное уравнение в виде: $Nu = c(Re_o)^n (Re')^m (\rho'/\rho'')^p Pr^{0,3}$. Подробно эти вопросы, а также численные значения коэффициентов c, n, m, p для различных режимов течения R 22 приведены в работах /11,14,20,36/, некоторые результаты которых изображены на рис.15.

Гидравлическое сопротивление при кипении фреонов в горизонтальных трубах обычно определяют по зависимостям Бо-Пьерре, однако последние относятся к температурам кипения до -35°C . Осуществлена проверка пригодности этих зависимостей в диапазоне температур кипения R 22 от -38 до -46°C при различных кратностях циркуляции /36/. Результаты измерений полного давления ΔP в сытной батарее и расчеты по зависимости Бо-Пьерре, изображенные на рис.16, подтвердили возможность ее применения в исследуемом диапазоне температур кипения, при этом отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает $8...15\%$. Одновременно была установлена закономерность изменения коэффициента трения от массового паросодержания $\lambda = f_1(x)$ /23/ и от приведенного критерия Рейнольдса для пара $\lambda = f_2(Re'')$ /22/, которая показана на рис.17.

Теплообмен в узких щелевых каналах батарей ПССО. Описание экспериментального стенда по исследованию теплообмена в узком щелевом канале батареи ПССО, сопоставление теоретических и экспериментальных данных по распределению температур на различных участках этой батареи приведены в работе /16/. Результаты экспериментальных исследований обобщены в критериальном виде $Nu = 0,24 Re^{0,52}$ ($6 \cdot 10^3 \geq Re \geq 10^5$) и $Nu = 0,045 Re^{0,82}$ ($Re > 10^6$) и изображены на рис.18.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРНТ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

ПССО не имела аналога в практике отечественного и зарубежного судостроения, поэтому были проведены комплексные исследования этой системы в натурных условиях на первых отечественных судах с ПССО: ПР "Исконна" (ПЭ) и ППР "Алтай" (НЭ). Результаты этих испытаний сопоставлены с аналогичными данными, полученными в процессе испытаний ТР "Валентин Серов" (ГССО), ПБ "Ленинградская слава", ТР "Уральские горы", ТР "Амурский залив" (бесканальные ВССО), РТМ "Ильичевск" и "Волжострой" (канальные ВССО). Испытания всех СРНТ проводились по единой методике с использованием однотипных измерительных устройств и приборов, с соблюдением общих принципов, гарантирующих в условиях натурального эксперимента высокую точность и достоверность результатов.

Методика и результаты экспериментальных исследований СРНТ подробно изложены в работах /7,48,49,50,51,52,56,62,64,67,П.2, П.4/, а основные выводы из них приведены ниже.

Температурные режимы в охлаждаемых помещениях. Различный характер формирования температурных полей определялся неоднозначностью условий тепло- и массообмена на границах штабеля груза (в особенности в его верхней и нижней частях), а также разной природой движущих сил, вызывающих циркуляцию внутриштабельного воздуха. Изменение средней температуры воздуха и груза по высоте охлаждаемых помещений показан в динамике на рис.20, где в качестве высоты принято количество слоев ящиков с мороженой рыбопродукцией. Результаты испытаний усреднены по

трем декадам в течение первого месяца хранения и ежемесячно - в течение второго и третьего месяцев.

ПССО. Закономерность формирования температурного поля воздуха и груза по высоте трюма и твиндека зависит от расположения охлаждаемого помещения на судне и принятой схемы экранирования. Так, в трюме ППР "Алтай" (рис.20) наиболее высокая температура наблюдалась в нижней части, где были повышенные теплопритоки и ухудшенные условия для их отвода, а наиболее низкая - в верхней части, вследствие интенсивного лучистого теплообмена между грузом и панельными приборами охлаждения. В верхнем твиндеке (рис.20а) и в трюме ПР "Исконна" (рис.20 д,е) зона повышенных температур наблюдалась в средней части, а низких - в верхней и нижней частях, причем в трюме ПР "Исконна" наблюдалась тенденция полного выравнивания температур во всем объеме. В большинстве периодов испытаний температуры воздуха и груза были равны или ниже спецификационной (-25°C), и только в верхнем твиндеке такая температура устанавливалась в верхней части, приблизительно в 45...50% его объема; а в третьей декаде - во всем объеме. Испытание нижнего твиндека ППР "Алтай" не проводили, так как априорно известно, что теплофизическая обстановка в нем более благоприятная в сравнении с трюмом и верхним твиндеком из-за его расположения между ними.

Другой важной особенностью ПССО является то, что при длительной эксплуатации в условиях инеобразования на поверхности панельных батарей, температурные режимы в охлаждаемых помещениях поддерживались стабильно и даже имели тенденцию к понижению (рис.21), при этом оттаивание панельных батарей не производилось.

ГССО. Закономерность формирования температурного поля воздуха и груза приблизительно такая же, как и в ПССО с неполным экранированием, однако, в отличие от последней, в течение длительной эксплуатации температуры воздуха и груза - не стабильны, а их распределение в объеме помещений - неравномерное (рис.20 в,г). Температуры воздуха и груза

не достигают спецификационных значений, а, начиная со второй декады хранения, в трюме (рис.20-г) и с третьей декады - в твиндеке (рис.20 в) эти среднеобъемные температуры систематически повышаются.

ВСО. При бесканальном воздухораспределении зона пониженных температур находится внизу, а зона повышенных - вверху (рис.20-з, и), при этом особенно неравномерное температурное поле наблюдается в твиндеке. При канальном воздухораспределении температурное поле имеет противоположный характер (рис.20-ж).

Характерной особенностью всех ВСО является то, что температурный режим в трюмах стабильно поддерживаться не может и подчиняется следующим закономерностям: в процессе оттаивания воздухоохладителей наблюдается резкое повышение температуры на 2 - 4°C, после его завершения - понижение на 3 - 5°C, а в промежутке между двумя оттаиваниями - монотонное повышение температуры. Как правило, в процессе загрузки оттаивание проводят через каждые 3-5 суток и сразу же после ее завершения, а в режиме хранения - через 10-25 суток. В результате наблюдается постоянное колебание температур воздуха и груза, при этом температура воздуха периодически бывала выше или ниже температуры груза, что приводило к систематическому изменению направления тепловых потоков между воздухом и грузом и ухудшению технологических режимов хранения.

Закономерность изменения температурных полей показана на рис.20-ж, з, и, из которых видно, что с течением времени температуры воздуха и груза повышаются. В твиндеке (рис.20-з) температура воздуха достигала спецификационного значения только после оттаивания воздухоохладителей в IV декаде хранения лишь в нижней его части, приблизительно в 10% его объема.

Относительная влажность воздуха. В СРНТ с естественной циркуляцией воздуха относительная влажность во всем объеме охлаждаемых помещений поддерживалась высокой и составляла 97-100%, а в ВСО - 89-93% внутри штабеля и 82-85% - снаружи.

Интенсивность домораживания груза в процессе загрузки. Домораживание груза в камерах хранения противоречит технологическим требованиям, так как этот процесс всегда ведет к ухудшению качества и сокращению срока хранения замороженного продукта, однако в реальных условиях эксплуатации это требование в силу ряда причин не всегда выполняется. Поэтому в процессе загрузки трюмов мороженой рыбопродукцией температура которой превышает допустимые технологические нормы, особую важность приобретает интенсивность процесса домораживания в начальной и самой ответственной стадии холодильного хранения. В условиях экспедиционного промысла, а он является основным в отечественной практике работы рыбопромысловых судов, значительную часть времени (до 70-80%) рефрижераторные трюмы находятся в состоянии частичной загрузки с продолжительностью 10-20 суток для каждого трюма.

На рис.22 изображены графики изменения средней температуры мороженой рыбы в процессе загрузки (рис. 22-а) и темп ее домораживания m (рис. 22-б) в зависимости от рассматриваемого интервала времени τ : $m_i = [(t_{d,i}) - (t_{d,i-1})] / \tau$. Анализ этих зависимостей показывает, что интенсивность домораживания груза в трюмах, оборудованных различными модификациями ПСО, выше аналогичных показателей для ВСО. Только в трюме с бесканальной ВСО через 7-11 суток после начала загрузки скорость домораживания сравнивалась, а затем и превосходила скорость домораживания груза в трюме с ПСО при неполном экранировании. Все другие ВСО, в том числе с бесканальным воздухораспределением в твиндеке (кривая 8), обладали более низкой интенсивностью этого процесса в сравнении с любой разновидностью ПСО. Полученные экспериментальные данные опровергают широко установившееся мнение о том, что ВСО создает условия для более интенсивного домораживания груза.

Физическая модель трюма с ВСО для двух случаев частичной загрузки показана на рис. 23-а. Степень загрузки трюма определяется величиной $K = V_r / V_{тр}$, а коэффициент эффективности воздухораспределения -

отношением фактического и расчетного количества воздуха $z = G_p / G_r$. Математическое описание процесса движения воздуха через штабель груза и незаполненную часть трюма представим в виде двухмерной модели с сосредоточенными параметрами и тогда уравнение материального баланса циркулирующего воздуха имеет вид: $G_o = G_r + G_c$; $G_p = G_r - G_c$; $G_p = K G_o$. Из уравнений аэродинамики порозных систем получаем выражение для z при вариантах загрузки А и Б соответственно:

$$z = 1 / K (1 + \beta) [(2H_w^3 / l^3)^{0.5} + 1]; m \omega_y^2 + n \omega_y - p = 0;$$

Здесь $\beta = [(\xi l + \eta - 1)(\xi_k + \eta - 1)]^{0.5}$; $\omega_y = z K G_o / l B_w$;
 $m = 2H_w^3 / l + 2\xi_n H_w^2 \epsilon^3 / \xi_w f_n h_n^2 - l$; $n = 2G_r / B_w$; $p = G_r^2 / B_w^2 l$.

На рис. 23 показан график зависимости $z = f(K)$, из которого видно, что для любого из рассмотренных вариантов принципиально невозможно обеспечить достаточно эффективное воздухораспределение. Двухмерную модель с сосредоточенными параметрами следует рассматривать лишь как первое приближение. В реальных условиях частичной загрузки при наличии дополнительных каналов по периметру штабеля и в районе пиллерсов эффективность воздухораспределения будет еще более низкой, чем та, которая изображена на рис. 23-б.

Потеря массы груза от усушки. На рис. 19 показано изменение средне-взвешенных потерь массы груза по высоте штабеля, а в работе /58/ отражены результаты экспериментального и теоретического определения потерь массы груза от усушки в различные периоды эксплуатации трюма и верхнего твиндека на ППР "Алтай". Средняя величина усушки, определенная теоретическим путем, составляла: для трюма 0,23%, для верхнего твиндека 0,18%, а соответствующие экспериментальные данные равны: 0,20 и 0,14%.

При анализе данных необходимо учесть следующее

1. Верхний твиндек ППР "Алтай" был загружен на 46%, а на ПР "Искон" (северные широты) - на 80%; поэтому относительная усушка при их 100% загрузке уменьшится пропорционально загруженности охлаждаемых по-

мещений и составит ориентировочно 0,06-0,07% и 0,20-0,21% соответственно.

2. Нижние твиндеки ППР "Алтай" находятся в более благоприятных условиях, они составляют приблизительно 1/3 общей грузоемкости судна. Если даже принять потерю массы в нижнем твиндеке такой же, как и в верхнем, то общая потеря массы от усушки по судну в целом не превысит 0,11-0,12%.

3. Трюмы транспортных рефрижераторов "Валентин Серов" и "Амурский залив" загружались быстро (1-2 суток), продолжительность нахождения груза в трюме при частичной загрузке мала, эксплуатационные теплопритоки минимальные, поэтому величина усушки на этих судах занижена в сравнении с судами производственного типа. Аналогичное положение имело место на ПР "Искон" в тропическом рейсе, когда судно использовалось в качестве транспортного.

Несмотря на такие особенности реальной промышленной обстановки, данные рис. 19 показывают, что потери массы груза от усушки в трюмах, оборудованных ПСО, ниже соответствующих потерь в 1,5-2,5 раза в сравнении с ГСО, в 2,9-5,5 раза в сравнении с ВСО.

Анализ результатов исследований. В табл. I и приложениях П.2-П.5 обобщены результаты исследований, характеризующие возможности СРНТ по обеспечению условий хранения мороженных грузов в соответствии с требованиями холодильной технологии, на основании которых можно сделать вывод, что ПСО практически по всем эксплуатационно-технологическим показателям имеет неоспоримые преимущества перед другими СРНТ. Хотя в ПСО, как и в других СРНТ, наблюдается разность температур воздуха и груза по высоте помещения, однако эти температуры имеют тенденцию к понижению в процессе длительного хранения при почти постоянных разностях температур между воздухом и грузом, а также между их верхними и нижними зонами.

Таким образом, данные табл. I показывают, что в рефрижераторных трюмах с ПСО создается такая теплотехническая обстановка, которая обе-

спечивает наиболее высокое качество хранения мороженой рыбопродукции в сравнении с другими СРНТ.

Таблица 1

ИР: Требования холодиль- ной технологии	ПСО	ГСО	ВСО
1. Защита груза от внешних теплопритоков	обеспечивается на 48-70%	обеспечивается на 18-27%	отсутствует полностью
2. Низкая температура воздуха до -30°C	поддерживается	не поддерживается	поддерживается в трюмах, не поддерживается в твиндеках
3. Стабильное поддержание температур воздуха в охлаждаемых помещениях	температура медленно понижается	температура вначале понижается, затем повышается	температура понижается с циклическим колебанием до 5-9°C через 3-5 суток при загрузке и 10-25 суток при хранении
4. Равномерное поле температур в объеме охлаждаемых помещений	разность температур по контура составляет, °C: 4,4-5,2(н.э) 0,2-3,6(п.э)	разность температур по высоте охлаждаемого штабеля, °C: 1,5-5,5	5,7-8,0
5. Равномерное поле температур в объеме штабеля груза	разность температур по высоте штабеля, °C: 1,2-3,0(н.э) 0-2,5(п.э)	1,2-3,9	4,0-7,4
6. Высокая относительная влажность воздуха до 93-95%	обеспечивается в любых частях штабеля выше 93 - 95%		обеспечивается только внутри штабеля, снаружи - не обеспечивается
7. Лучистый теплообмен между грузом и приборами охлаждения	очень высокий	высокий	отсутствует
8. Малые потери массы груза от усушки	0,11-0,21%	0,20-0,31%	0,35-0,81%
9. Естественная конвекция воздуха	обеспечивается		не обеспечивается

4. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СРНТ

Технические показатели. Эти исследования были проведены по 16 современным судам, оборудованным различными СРНТ. Методика сравнительного анализа и его результаты приведены в работах /6,43,44,45,46,54,59,63,65/, а основные выводы - в табл. 2 и на рис.24. В числителе табл. 2 показаны удельные показатели СРНТ, отнесенные к полезному объему трюмов: энергетические (Вт/м³), массовые (кг/м³), объемные (м³/м³), а

в знаменателе - относительные показатели (ГСО с однорядными батареями принята за базу сравнения).

На рис.24 изображены составляющие относительных энергозатрат: на ассимиляцию теплопритоков в трюмах - N'_k , на привод механизмов N_m и на их тепловой эквивалент в общей мощности компрессоров $N_k = N'_k + N_m$.

Таблица 2

Система охлаждения	Энергетические	Массовые	Объемные
ГСО (ПХ, однорядные батареи)	20,5/1,0	23,9/1,0	0,104/1,0
ГСО (ПХ, двухрядные батареи)	26,9/1,31	36,2/1,51	0,169/1,62
РСО (ПХ)х/	13,9/0,68	19,1/0,80	0,108/1,04
ВСО (ПХ, НК, канальная)	43,3-51,0 2,11-2,49	23,6/0,99	0,221/2,12
ВСО (ПХ, НК, бесканальная)	29,0-34,5 1,41-1,68	17,7/0,74	0,127/1,22
ПСО (ПХ, Пэ)	12,2/0,59	35,9/1,50	0,059/0,57
ПСО (ПХ, Нэ)	13,8/0,67	26,0/1,09	0,048/0,46

х/кратковременная эксплуатация

Из рис.24 и табл. 2 видно, что ПСО по сравнению с ВСО обладают более низкими энергозатратами и объемными потерями, но, вместе с тем, имеют повышенные массовые показатели. В то же время приведенные в таблице данные отражают технические показатели только системы охлаждения в трюмах, не затрагивая других, косвенно зависящих от нее элементов.

Комплексные технико-экономические показатели. Результаты натурных исследований СРНТ, данные их эксплуатации и продолжающееся строительство добывающих и обрабатывающих судов с ВСО показали, что основное внимание следует сосредоточить на различных аспектах комплексного сравнительного анализа ПСО и ВСО. С этой целью разработана методика, математическая модель и программа для ЭВМ на языке ФОРТРАН (П.2) для комплексной оценки технико-экономических показателей этих систем с учетом специфического оборудования в трюмах, РМО и запасов топлива, необходимого для их функционирования. Исходные данные использованы из работ /43,44,45,46,54,59/.

В качестве критериев технической эффективности предложены коэффициенты использования располагаемого объема по грузоподъемности

$\eta_v = V_n / V_p$ и располагаемой массы по грузоподъемности $\eta_g = G_n / G_p$, а в качестве критерия экономической эффективности - удельные годовые приведенные затраты, отнесенные к единице полезного объема трюмов $Z_{пр}$ (руб/м³ год).

Здесь: $V_p = V_n + V_k$; $G_p = G_n + G_k$; $V_k = V_c + V_{xy} + V_t$; $G_k = G_c + G_{xy} + G_t$ - соответственно располагаемые и комплексные объемы и массы СРНТ.

Проведен анализ 5400 вариантов различных типов холодильных установок, грузоподъемностей рефрижераторных трюмов, автономностей плавания, районов промысла, температур окружающей среды, коэффициентов теплопередачи наружных ограждений, суточных производительностей морозильных установок и начальных температур поступающей в трюм рыбопродукции. Некоторые результаты такого анализа изображены на рис.25, из которого видно, что объемные потери по абсолютной величине больше, чем массовые, а для рыбопромысловых рефрижераторных судов объемные показатели имеют преимущественное значение перед массовыми /54/. Для удобства анализа критерии η_v , η_g и $Z_{пр}$ представлены в относительном виде $(\eta_v)_o = (\eta_v)_i / (\eta_v)_{max}$; $(\eta_g)_o = (\eta_g)_i / (\eta_g)_{max}$; $(Z_{пр})_o = (Z_{пр})_i / (Z_{пр})_{min}$. Подробно этот вопрос освещен в работах /12,13,15,61,П.2,П.4/, а некоторые выводы из них приведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатель	1-Д, 717, П.Х: 2-0, 22	3-Д, 22	4-П.Э.	5-Н.Э.
$(\eta_v)_o$	0,953-0,954	0,958-0,962	0,957-0,958	0,989-0,990
$(\eta_g)_o$	0,976-0,975	0,996	1,000	0,958-0,960
$(Z_{пр})_o$	1,199-1,283	1,011-1,038	1,000	1,243-1,422
Системы с одинаковыми холодильными установками				
$(\eta_v)_o$	0,953-0,954	-	-	0,989-0,990
$(\eta_g)_o$	0,993-0,997	-	-	0,978
$(Z_{пр})_o$	1,091-1,118	-	-	1,159-1,209

Примечание: Д - двухступенчатая х.у., 0 - одноступенчатая х.у.

Из табл.2 видно, что в сопоставимых условиях при одинаковых холодильных установках по всем критериям оптимизации ПСО превосходит ВСО, а в остальных случаях - только по объемным показателям.

Комплексные энергетические показатели. В работах /25,26/ рассмотрены соотношения между отдельными составляющими теплопритоков ПСО и ВСО, а в /30,31/ - между общими теплопритоками, холодопроизводительностью и энергозатратами установки в целом.

В комплексные энергетические показатели включены все прямые и косвенно зависящие энергозатраты: компрессоров, насосов (охлаждения конденсаторов, рассольных, холодильного агента, глазировочных аппаратов), электровентиляторов, на оттаивание приборов охлаждения и поддонов воздухоохладителей.

Графики зависимости $Q_k = f_1(K)_{всо}$, $Q_q = f_2(Q)_{всо}$ и $n_{xy} = f_3(N)_{всо}$, где $Q_k = K_{псо} / K_{всо}$, $Q_q = Q_{псо} / Q_{всо}$ и $n_{xy} = N_{псо} / N_{всо}$ показаны на рис.26 и 27. Из анализа рис.27 можно сделать вывод, что различные модификации ПСО, в том числе и с промежуточным хладоносителем, в сравнении с ВСО при непосредственном кипении R 22 в одинаковых условиях сопоставления обладают меньшими холодопроизводительностью и мощностью приблизительно на 10-50% за счет максимального экранирования наружных ограждений, рациональных геометрических размеров теплопередающего элемента /П.20/ и меньших теплопритоков /25,26,30/.

5. ВЛИЯНИЕ ТИПА СРНТ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЫБОПРОМЫСЛОВОГО СУДНА

Комплексный сравнительный анализ и оценка влияния типа СРНТ на технические показатели рыбопромыслового судна освещены подробно в работах /24,27,П.4,П.5/, в которых предложены два методических подхода, каждый из которых зависит от постановки задачи исследования. Метод А. Основан на сравнении ПСО и ВСО на траулерах с одинаковыми главными размерениями ($L, B, H = const$), автономностями плавания, главными и вспомогательными энергетическими установками. При этом повышенный полезный объем трюмов и меньшие энергозатраты ПСО приведут к воз-

ростанию полезной грузоподъемности и к сокращению запасов топлива на работу холодильной установки. Увеличится D_f , но в меньшей степени, чем D_r , за счет сокращения D_z . Незначительно возрастет D_0 из-за большей массы ПСО. В конечном итоге вырастет D , поэтому незначительно возрастут энергозатраты и запасы топлива для главной силовой установки. Расчеты показывают, что увеличение D не превышает 2%, что допустимо, так как траулер, как правило, проектируется с избыточным надводным бортом и обладает запасом водоизмещения.

Метод В. Основан на сравнении ПСО и ВСО на траулерах с одинаковыми полезными грузоместимостями трюмов ($V_n = \text{const}$), автономностями плавания и продолжительностью промыслового рейса. В этом случае меньшие объемные потери ПСО скажутся на сокращении располагаемого объема трюмов и поверхности их наклонных ограждений, что приведет к большему, чем в предыдущем случае, сокращению энергетических затрат и запасов топлива на работу холодильной установки. По этой же причине снизится масса ПСО. Это вызовет уменьшение главных размерений судна, весовой нагрузки корпуса и изоляционной конструкции, энергетических затрат и запасов топлива для главной силовой установки.

Изменение отдельных элементов весовой нагрузки траулера, оборудованного ПСО, повлияет на величину коэффициентов утилизации водоизмещения по чистой грузоподъемности $\eta_r = D_r/D$ и по дедвейту $\eta_{Dz} = D_z/D$, которые являются показателями совершенства судна, как сложного инженерного сооружения.

На рис. 28-а изображены траулеры, оборудованные ПСО и ВСО. Так как всегда $\Delta V_{\text{ПСО}} < \Delta V_{\text{ВСО}}$, то в соответствии с методом А $(L, B, H)_{\text{ПСО}} = (L, B, H)_{\text{ВСО}}$, $(V_n)_{\text{ПСО}} = (V_n)_{\text{ВСО}} + \Delta V_n$, и, таким образом, $(V_n)_{\text{ПСО}} > (V_n)_{\text{ВСО}}$. В соответствии с методом В $(V_n)_{\text{ПСО}} = (V_n)_{\text{ВСО}}$; $(V_r)_{\text{ПСО}} = (V_r)_{\text{ВСО}} - \Delta V_r$ и, следовательно, $(L, B, H)_{\text{ПСО}} < (L, B, H)_{\text{ВСО}}$.

Второй методический подход по сравнению с первым более корректен, так как имеет одинаковую базу сравнения: равные полезные объемы рефрижераторных трюмов, одинаковый выпуск продукции при одной и той же

продолжительности промыслового рейса.

Результаты анализа. Показаны на рис. 28-б и 28-в применительно к двум современным траулерам отечественной постройки типов "Горизонт" (пр. 1386) и "Антарктида" (пр. 16080), оборудованных ВСО. Данные по ПСО приведены для насосно-циркуляционной системы на $R 22$ с панелями стальной конструкции, а для панелей из алюминиевого сплава - показаны в скобках.

Из рис. 27 видно, что траулеры, оборудованные ПСО, обладают лучшими показателями в сравнении с траулерами, оборудованными ВСО. Коэффициенты утилизации η_r и η_{Dz} выше соответствующих показателей базовых судов, оборудованных ВСО, на 3,06-5,32% (η_r) и на 1,76 - 2,51% (η_{Dz}), что свидетельствует о более рациональном использовании их водоизмещения. Из приведенных данных видно, что использование первого метода для сравнения СРНТ на вновь проектируемых судах искажает истинные технико-экономические показатели. Так, по этому методу, годовой расход топлива в расчете на один траулер рассмотренных типов сокращается на 27-28 т, а расход материалов увеличивается на 17-18 т. По второму методу уменьшаются как расходы топлива на 107-115 т, так и материалов на 210-250 т. Масса ПСО с панелями из алюминиевых сплавов сокращается дополнительно еще на 14-24 т. Поэтому методом А следует пользоваться только при переоборудовании судов и сравнении СРНТ на эксплуатируемых траулерах, в то время как методом В - при новом проектировании.

6. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ НАРОДНО-ХОЗЯЙСТВЕННАЯ ЗНАЧИМОСТЬ. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПСО

В сотрудничестве с ЦКБ "Черноморсудопроект" и "Восток", судостроительными заводами "Океан" и "Черноморский" результаты исследований внедрены на судах проектов 582, 1376, 394-А, 394-АМ, 413. На этих судах низкотемпературные трюмы оборудованы ПСО с промежуточным хладоносителем и стальными приборами охлаждения. Внедрение ПСО осу-

ществлено на 173 судах общим водоизмещением более 840 тыс т и грузоместимостью рефрижераторных трюмов около 320 тыс.м³ с годовым экономическим эффектом свыше 8 млн. руб., а с учетом четырех последующих лет эксплуатации - 36,5 млн. руб. Сводные данные о внедрении ПСО приложены в табл.4, составленной на основании /П.6-П.13/.

Таблица 4

№ п/п	Тип судна, № проекта	Количество судов с ПСО	Экономический эффект тыс. руб.		Полный экономический эффект тыс.руб.
			за первый год	за 4 последующих года эксплуатации	
1.	ПР "Таврия", пр.582	II	820,0	2820,4	3640,4
2.	ППР "Алтай", пр.1376	3I	2594,7	8484,1	11078,8
3.	БМРТ "Пионер Ладвии", проекты 394-А, 394-АМ	127	4099,6	14903,1	18902,7
4.	ПВ "Пятидесятилетие" СССР", пр. 413	4	675,8	2274,0	2949,8
	Всего	173	8190,1	28381,6	36571,7

О положительных эксплуатационных особенностях ПСО свидетельствуют отзывы производственных рыбопромышленных объединений Северного, Западного и Дальневосточного бассейнов, в ведении которых находятся перечисленные выше суда /П.14-П.18/. Совместно с Управлением Мурманского тралового флота и судостроительным заводом "Океан" осуществлено опытное внедрение ПВСО в одной из камер провизионного блока на траулере проекта 1386 "Капитан Телов".

В содружестве с институтом электросварки АН УССР им.Е.О.Патона и Всесоюзным институтом легких сплавов созданы с применением современных технологических процессов новые теплопередающие элементы (рис.4-б,в). На базе этих разработок совместно с Управлением Мурманского тралового флота, ЦПКТБ "Севрыба", Эстонским производственным судоремонтным объединением "Эстремрыбфлот" и ЦПКТБ "Азчеррыба" создан опытно-промышленный образец ПСО с биметаллическими приборами охлаждения (рис.4-б) в трюме и твиндеке № 2 на ППР "Березники" /29,33,34,38,П.19/- и подготовлена техническая документация для опытной насосно-циркуляционной ПСО

на Р 22 с панелями из алюминиевых сплавов (рис.4-в) для траулера типа "Прометей" /28,29,35,37/.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена, разработана, создана и исследована принципиально новая судовая ПСО, в максимальной степени удовлетворяющая требованиям холодильной технологии и отличающаяся пониженными энергозатратами и эффективным использованием водоизмещения рыбопромыслового судна; внедрение этих систем на 173 судах флота рыбной промышленности позволило получить годовой экономический эффект более 8 млн. рублей, а за первые 5 лет эксплуатации - 36,5 млн. рублей.

2. Установлены закономерности теплообмена, созданы основы проектирования судовых ПСО, экспериментально получены их важные тепло-и массообменные характеристики, на базе которых разработана программа для ЭС ЭВМ, реализующая выбор оптимальных геометрических размеров теплопередающего элемента панельной батареи для заданных условий эксплуатации.

3. Получены и обобщены экспериментальные данные, определяющие тепловые, энергетические и эксплуатационно-технологические характеристики СРНТ, произведен их сравнительный анализ на общей методической основе.

4. Доказано, что домораживание груза в процессе загрузки трюмов, оборудованных ПСО, более интенсивное в сравнении со всеми другими СРНТ, в том числе и с ВСО.

5. Разработана математическая модель по комплексной оценке технико-экономических характеристик СРНТ и программа для ЭВМ, получены и обобщены новые данные по критериям оптимизации (η_v , η_d , η_{tr}) в широком диапазоне конструктивных особенностей и условий эксплуатации рефрижераторных трюмов, оборудованных различными СРНТ.

6. Предложены, разработаны и исследованы новые модификации ПСО с применением современных технологий при изготовлении приборов охлаждения: с промежуточным хладоносителем и биметаллическими батареями (ПСО внедрена в виде опытной) и насосно-циркуляционная на Р 22 с батарея-

ми из алюминиевых сплавов (установлены закономерности термогравитационных процессов при вынужденном движении двухфазного потока R_{22} в горизонтальных трубах); технические решения этих разработок повышают энергетическую эффективность и снижают массовые показатели ПСО.

7. Предложена, разработана, исследована и внедрена в виде опытной новал ПВСО; теоретически определены основы теплопереноса и закономерности динамических процессов при инееобразовании; экспериментально установлены закономерности теплообмена в узких щелевых каналах батарей ПВСО.

8. Все модификации ПСО, в том числе и с промежуточным хладоносителем, при комплексном учете всех составляющих энергозатрат более выгодны по энергетическим показателям в сравнении с ВСО при непосредственном кипении R_{22} .

9. Разработан и осуществлен комплексный, системный сравнительный анализ СРНТ, определено влияние всех составляющих массогабаритных и энергетических показателей СРНТ на технические характеристики рыбопромыслового рефрижераторного судна; установлено, что суда, рефрижераторные трюмы которых оборудованы ПСО, обладают более высокими коэффициентами утилизации водоизмещения по чистой грузоподъемности и по дедейте в сравнении с судами, трюмы которых оборудованы ВСО; доказано, что общепринятый метод сравнительного анализа СРНТ нельзя применять к вновь проектируемым судам.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Авдеев Е.С. Опыт эксплуатации и внедрения панельной системы охлаждения на рефрижераторных судах флота рыбной промышленности. Труды Всесоюзной межвузовской конференции "Проблемы интенсификации холодильного и технологического пищевого оборудования". Сб. докладов секций "Холодильные машины" и "Холодильные установки". Л., 1967, с. 43-48.

2. Авдеев Е.С. Номограммы для расчета панельных систем охлаждения рефрижераторных судов. - "Рыбное хозяйство", 1968, № 3, с. 60-62.

3. Авдеев Е.С. Универсальные номограммы для расчета рефрижераторных трюмов, оборудованных панельной системой охлаждения. - "Рыбное хозяйство", 1970, № 6, с. 25-28.

4. Авдеев Е.С., Карев В.И., Баландин И.А., Старых Ю.В. Панельная система охлаждения рефрижераторных трюмов на промыслово-производственном рефрижераторе. - "Рыбное хозяйство", 1970, № II, с. 21-23.

5. Авдеев Е.С., Кроль В.М. Теплопередача панельно-воздушной системы охлаждения с листотрубными батареями. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1972, вып. 14, с. 12-15.

6. Авдеев Е.С., Хордас Г.С., Жадан В.З. Справочник судового механика, том II, гл. 14, "Холодильные установки". - М., Транспорт, 1974, с. 897-956.

7. Авдеев Е.С., Комаров В.С., Цвиговский Г.К., Яременко Л.М. Испытания холодильной установки транспортного рефрижератора, работающего на фреоне-22. Сб. трудов "Холодильная техника и технология", Киев, Техника, 1974, вып. 18, с. 64-69.

8. Авдеев Е.С., Карев В.И., Костенко В.П. Эффективность конструктивных элементов судовых панельных приборов охлаждения. Сб. трудов "Холодильная техника и технология", Киев, Техника, 1974, вып. 19, с. 8-13.

9. Авдеев Е.С., Кан А.В. Панельные системы охлаждения на рефрижераторных судах. - "Холодильная техника", 1974, № 9, с. 41-43.

10. Авдеев Е.С., Комаров В.С., Бычкова Г.А., Яременко Л.М. Исследование тепловых процессов в элементах судовых воздухоохладителей, работающих на фреоне-22. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1976, вып. 22, с. 24-27.

11. Авдеев Е.С., Комаров В.С., Яременко Л.М., Савчук С.В. Внутренний теплообмен при кипении фреона-22 в аппаратах судовых холодильных установок. - "Рыбное хозяйство", 1976, № 9, с. 38-40.

12. Авдеев Е.С., Цвиговский Г.К., Карев В.И., Мельникова В.П., Бычкова Г.А. Технические характеристики охлаждающих систем рефрижераторных промысловых судов. - "Рыбное хозяйство", 1976, № II, с. 42-45.

13. Авдеев Е.С., Цвиговский Г.К., Карев В.И., Бычкова Г.А., Мельникова В.П. Техно-экономические показатели охлаждающих систем рефрижераторных трюмов. - "Рыбное хозяйство", 1977, № I, с. 39-43.

14. Авдеев Е.С., Комаров В.С., Яременко Л.М., Савчук С.В. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении фреона-22 в судовых насосных системах охлаждения. - "Рыбное хозяйство", 1977, № 2, с. 31-33.

15. Авдеев Е.С., Мельникова В.П., Бычкова Г.А., Цвиговский Г.К., Карев В.И. Показатели эффективности систем охлаждения грузовых трюмов. - "Судостроение", 1977, № 3, с. 18-20.

16. Авдеев Е.С., Кроль В.М. Экспериментальное исследование теплообмена в щелевых каналах панельно-воздушных приборов охлаждения. Сб. трудов "Холодильная техника и технология", Киев, Техника, 1977, вып. 24, с. 3-6.

17. Авдеев Е.С., Кроль В.М. Теоретическое определение максимальной толщины слоя инея на панельно-воздушных приборах охлаждения. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1977, вып. 25, с.19-23.
18. Авдеев Е.С., Кроль В.М. Определение времени осаждения инея на охлаждающей поверхности. Сб. трудов "Холодильная техника и технология", Киев, Техника, 1978, вып.27, с.74-76.
19. Авдеев Е.С., Цигровский Г.К. Холодильная камера для хранения пищевых продуктов. А.С. № 629416, 1978, бюл. № 39.
20. Авдеев Е.С., Комаров В.С., Яременко Л.М. Структурные диаграммы для двухфазного потока фреона-22 при кипении в горизонтальных трубах. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1979, вып.28, с.72-73.
21. Авдеев Е.С. Уточненный метод расчета судовой панельной системы охлаждения. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1979, вып. 29, с.6-9.
22. Авдеев Е.С., Комаров В.С., Яременко Л.М. Исследование потери давления при двухфазном течении кипящего хладагента. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1980, вып.31, с.67-68.
23. Авдеев Е.С., Комаров В.С., Вородай О.С., Яременко Л.М. Определение потерь давления при двухфазном течении. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1981, вып.33, с.69-72.
24. Авдеев Е.С. Новое направление в развитии панельных систем охлаждения для крупных траулеров. Тезисы доклада УИ Научно-технической конференции по развитию флота рыбной промышленности и промышленного рыболовства социалистических стран. Минрыбхоз СССР, Ленинград, 1983.
25. Авдеев Е.С. О соотношении наружных теплопритоков в судовых рефрижераторных помещениях, оборудованных воздушными и панельными системами охлаждения. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1984, вып.33, с.47-53.
26. Авдеев Е.С. Особенности учета теплопритоков, вызванных глазированием замороженной рыбопродукции на рыбоморозильных траулерах. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1984, вып. 38, с.58-64.
27. Авдеев Е.С. Новое направление в развитии панельных систем охлаждения для крупных траулеров. Проблемы и перспективы. Доклад № 3.20 на УИ Научно-технической конференции по развитию флота рыбной промышленности и промышленного рыболовства социалистических стран. Минрыбхоз СССР. Ленинград, 1984, 14 с.
28. Авдеев Е.С., Бычкова Г.А., Мельникова В.П. Особенности применения фреоновой насосно-циркуляционной панельной системы охлаждения

- для рыбоморозильных траулеров. Тезисы доклада на Всесоюзном семинаре "Использование холода для сокращения потерь пищевых продуктов - важное средство в решении Продовольственной программы страны". Калининград, 1984.
29. Авдеев Е.С., Борисова Н.И., Баландин И.А., Бычкова Г.А. Пути повышения эффективности судовых панельных систем охлаждения. Тезисы доклада на Всесоюзной конференции "Повышение надежности и эффективности судового теплообменного оборудования". Севастополь, 1985.
 30. Авдеев Е.С., Бычкова Г.А., Мельникова В.П. Соотношение тепловых потоков в низкотемпературных рефрижераторных трюмах рыбоморозильных траулеров. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1987, вып. 44, с.92-97.
 31. Авдеев Е.С., Бычкова Г.А., Мельникова В.П. Энергетические затраты холодильных установок рыболовных морозильных траулеров с воздушной и панельной системами охлаждения. Тезисы доклада "Отраслевого совещания по холодильному направлению Минрыбхоза СССР", Ивангород, 26-30 октября 1987 г.
 32. Авдеев Е.С., Карев В.И., Мельникова В.П., Разумов Г.А., Таранец Л.Ф. О потерях мороженой рыбопродукции при хранении в трюмах рыбопромысловых судов. Тезисы доклада "Отраслевого совещания по холодильному направлению Минрыбхоза СССР", Ивангород, 26-30 октября 1987г.
 33. Баландин И.А., Авдеев Е.С., Борисова Н.И., Рябов В.Р., Кирпатый В.А. Судовые биметаллические приборы охлаждения. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1985, вып.41, с.25-29.
 34. Кирпатый В.А., Гильденгорн М.С., Авдеев Е.С., Баландин И.А., Рабкин Д.М., Рябов В.Р., Муравейник А.Н. Рассольная панель. А.С. № 1086335, 1984, бюл. № 14.
 35. Комаров В.С., Авдеев Е.С., Парижский О.В. Холодильная установка с насосно-циркуляционной системой охлаждения. А.С. № 559076, 1977, бюл. № 19.
 36. Комаров В.С., Авдеев Е.С. Экспериментальные данные о теплообмене и гидродинамике при двухфазном течении фреона-22 в горизонтальных трубчатых батареях. - "Холодильная техника", 1978, № 1, с. 22-26.
 37. Монюшко В.Л., Киселев В.А., Авдеев Е.С., Комаров В.С. Холодильная установка с насосно-циркуляционной системой охлаждения. А.С. № 732632, 1980, бюл. № 17.
 38. Рабкин Д.М., Кирпатый В.А., Муравейник А.Н., Гильденгорн М.С., Авдеев Е.С., Баландин И.А., Борисова Н.И. Сварка сталеалюминиевых панелей охлаждения трюмов. - "Автоматическая сварка". Киев, 1985, № 1, с. 42-44.

39. Старых Ю.В., Авдеев Е.С., Цвиговский Г.П. Опыт применения панельной системы охлаждения на рефрижераторе "Крейцвальд". - "Судостроение", 1969, № 5, с.23-25.
40. Чулкин С.Г., Никульшина Д.Г., Авдеев Е.С., Русов Е.Х., Коньков А.М., Старых Ю.В. Устройство тихого (батарейного) охлаждения рефрижераторных камер. А.С. № 162762, 1964, бюл. № 10.
41. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С. Особенности и перспективы внедрения панельных систем охлаждения на рефрижераторных судах. - "Рыбное хозяйство", 1969, № 11, с.49-51.
42. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С. Панельные системы охлаждения рефрижераторных судов. - Л., Судостроение, 1969, 222 с.
43. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Цвиговский Г.К., Костенко В.П. Энергетические характеристики охлаждающих систем рефрижераторных трюмов рыбопромысловых судов. - "Рыбное хозяйство", 1969, № 12, с.23-25.
44. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Цвиговский Г.А., Костенко В.П. Энергетические характеристики охлаждающих систем рефрижераторных трюмов рыбопромысловых судов. - "Рыбное хозяйство", 1970, № 2, с.32-34.
45. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С. Панельная система охлаждения рефрижераторных рыбопромысловых судов и ее технико-эксплуатационные показатели. Тезисы докладов к У Научно-технической конференции по кондиционированию воздуха и рефрижерации на судах НТО судостроительной промышленности им. акад. А.Н. Крылова, Судостроение, 1970, с.83-87.
46. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Цвиговский Г.К. Весогабаритные характеристики охлаждающих систем рефрижераторных трюмов. - "Рыбное хозяйство", 1970, № 5, с.24-26.
47. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С. Холодильная камера для хранения пищевых продуктов. А.С. № 282353, 1970, бюл. № 30.
48. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Карев В.И., Шахрай И.К. Испытание судовой холодильной установки рефрижератора "Алтай". - "Холодильная техника", 1970, № 10, с.21-24.
49. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Карев В.И. Эксплуатационные характеристики рефрижераторных трюмов с панельной системой охлаждения. - "Холодильная техника", 1971, № 3, с.8-12.
50. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Цвиговский Г.К. Эксплуатационные испытания воздушной системы охлаждения рефрижераторных трюмов с вертикальным воздушораспределением. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1971, вып. 12, с.3-6.
51. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Цвиговский Г.К. Условия хранения груза на рефрижераторных судах, оборудованных системами охлаждения с принудительной циркуляцией воздуха. - "Рыбное хозяйство", 1971, № 11, с. 31-34.

52. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Карев В.И. Условия хранения груза на рефрижераторных судах, оборудованных системами охлаждения с естественной циркуляцией воздуха. - "Рыбное хозяйство", 1972, № 1, с.24-28.
53. Чулкин С.Г., Кроль В.М., Авдеев Е.С. Теплопередача панельно-воздушных приборов охлаждения. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1972, вып. 14, с.7-12.
54. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Карев В.И., Цвиговский Г.К. Выбор системы охлаждения трюмов рефрижераторных судов. - "Судостроение", 1972, № 12, с.21-24.
55. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Кроль В.М. Определение теплопередачи панельно-воздушной системы в режиме панельного охлаждения. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1972, вып. 15, с.1-6.
56. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Шахрай И.К., Костко В.И. Эксплуатационные характеристики системы охлаждения рефрижераторных трюмов РТМ типа "Атлантик". - "Рыбное хозяйство", 1973, № 8, с.28-30.
57. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Карев В.И., Костенко В.П. Экспериментальное исследование теплообмена судовых панельных приборов охлаждения. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1974, вып. 19, с.3-7.
58. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Карев В.И., Мельникова В.П. Особенности теплообмена в рефрижераторных трюмах, оборудованных панельной системой охлаждения. Сб. трудов "Холодильная техника и технология". Киев, Техника, 1975, вып. 20, с.3-8.
59. Чулкин С.Г., Авдеев Е.С., Карев В.И., Цвиговский Г.К. Некоторые результаты сравнительного анализа систем охлаждения рефрижераторных трюмов. - "Холодильная техника", 1976, № 6, с.35-39.
60. Чумак И.Г., Гордиенко А.В., Авдеев Е.С., Комаров В.С., Козьмин Н.А. Исследование термодинамических процессов в насосно-циркуляционных системах охлаждения. Тезисы докладов на VI национальной научно-технической конференции с международным участием "Современные направления в развитии холодильной техники и технологии". Пловдив, Болгария, 1977.
61. Betriebliche und komplexe technische Kennwerte von Laderaum-Kühlsystemen. Kurzreferate, Schiffbautechnische Tagung mit Beteiligung aus RGW-Ländern, Berlin, 1976 (Avdejev E.S., Karev V.I.).
62. Chuklin S.G., Avdejev E.G., Tsvigovsky G.K., Karev V.I. Operating characteristics of refrigerated holds of fishing vessels equipped with modern cooling system. Progress in Refrigeration science and

technology, Washington, D.C., 1971, Proceeding of the XIII International Congress of Refrigeration, V.4. Avi publishing company, U.S.A., 1975.

63. Chuklin S.G., Avdejev E.S., Karev V.I., Tsvigovsky G.K. Comparative analysis of cooling systems in refrigerated holds and some results of it. XIV International Congress of Refrigeration. Preprints, Commission D 3, 1976.

64. Conditions of frozen fish storage on fishing refrigerators, International Institute of Refrigeration. Preprints, Commission Meeting, D 3, B 2, March, 5-7, 1974, Tokyo, Japan (Chuklin S.G., Avdejev E.S., Karev V.I., Tsvigovsky G.K.).

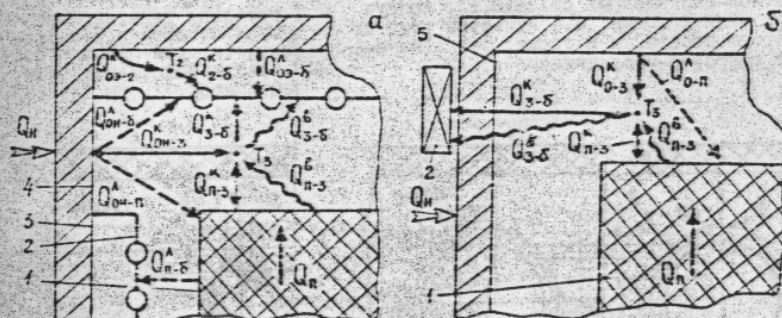
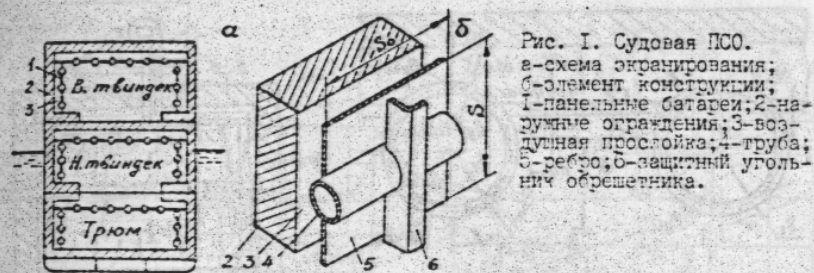
65. Comparative analysis of cooling systems for refrigerated ship holds and the results of this analysis. Bulletin International Institute of Refrigeration. Tom IV, N 3, 1975 (Chuklin S.G., Avdejev E.S., Karev V.I., Tsvigovsky G.K.).

66. Empoi du systeme de refrigeration par panneaux sur le navire frigorifique "Krejevald". D'apres Sudostroenie. - "Navires, ports et chantiers", 1970, N 246, november (Starykh J.V., Avdejev E.S., Tsvigovsky G.K.).

67. Operating characteristics of refrigerated holds of fishing vessels equipped with modern cooling systems. XIII International Congress of Refrigeration. Bulletin special issue. International Institute of Refrigeration, VII, N 3, 1971 (Chuklin S.G., Avdejev E.S., Tsvigovsky G.K., Karev V.I.).

ПРИЛОЖЕНИЯ

- П.1 Структурная схема диссертации.
- П.1-П.3 Рациональная система охлаждения рефрижераторных трюмов для судов флота рыбной промышленности (Авдеев Е.С., доклад на НТС Минрыбхоза СССР, 1976, 38 с) и протокол № II заседания НТС от 27.05.1976 г.
- П.4-П.5 Выбор оптимальной системы охлаждения для крупных рыбоморозильных траулеров в свете перспектив развития рыбного хозяйства на XI и XII пятилетки (Авдеев Е.С., доклад на НТС Минрыбхоза СССР, 1980, 67 с.) и протокол № 18 заседания НТС от 5.09.1980 г.
- П.6 Выписка из приказа Министра судостроительной промышленности СССР от 18.02.1969 г. № 33.
- П.7-П.19 Акты, справки о внедрении, расчеты экономической эффективности, отзывы производственных объединений.
- П.20 Программа для ЭВМ "Выбор оптимальных геометрических характеристик судовой панельной батареи."



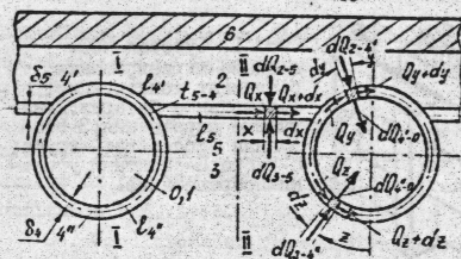


Рис. 5. Теплопередающий элемент ПСО. 0, 1, 2, 3 - охлаждающая среда (0, 1), воздух (2, 3); 4, 4' - участки труб со стороны прослойки и трума; 5 - плавниковое ребро; 6 - изоляция.

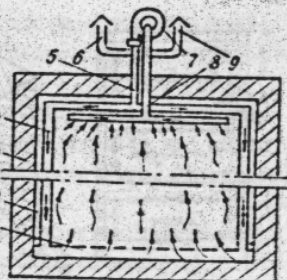


Рис. 6. Схема камеры ПСО. 1 - грузовая решетка; 2 - воздушная прослойка; 3 - изоляция; 4 - батарея ПСО; 5, 6, 7 - воздуховоды; 8 - электро-вентилятор.

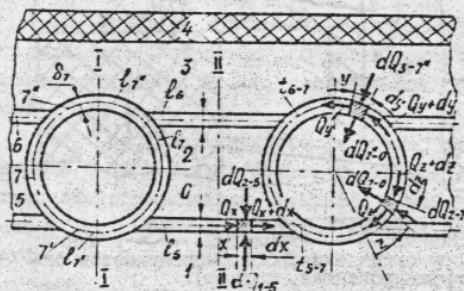


Рис. 7. Теплопередающий элемент ПСО. 0, 1, 2, 3 - охлаждающая среда, воздух камеры, панели, прослойки; 4 - изоляция; 5, 6 - ребра со стороны камеры, прослойки; 7, 7' - участки труб со стороны панели, камеры, прослойки.

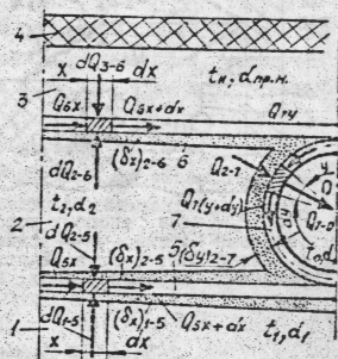


Рис. 8. Теплопередающий элемент ПСО со слоем инея. 0, 1, 2, 3 - охлаждающая среда, воздух камеры, панели, прослойки; 4 - изоляция; 5, 6 - ребра со стороны камеры, прослойки; 7 - труба.

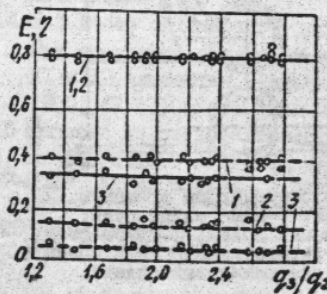


Рис. 9. Коэффициенты эффективности E (сплошная линия) основных конструктивных элементов и доля тепловой нагрузки q_2 (штриховая линия), воспринимаемая ими. 1 - плавниковое ребро; 2 - обрешетник; 3 - концевые ребра.

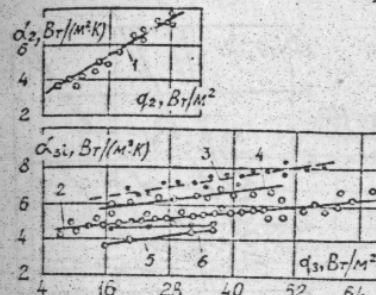


Рис. 10. График зависимости $\alpha_2 = f(q_2)$ при режимах: 1, 2, 4 - сухом (1, 2 - борт, переборка; 3 - подволлок, 4 - среднее); 5, 6 - влажном (5 - $\alpha_{2пр}$, 6 - α_{23}).

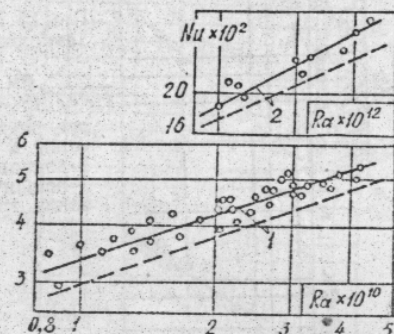


Рис. 11. График зависимости $Nu = f(Ra)$ — данные эксперимента; — — — данные по зависимости $Nu = 0,135 Ra^{1/3}$; 1 - борт, переборка; 2 - подволлок.

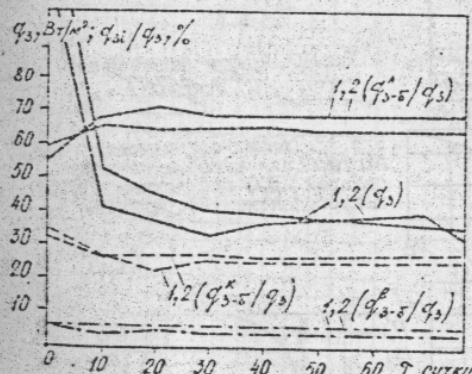


Рис. 12. Составляющие тепловых потоков ПСО. 1 - борт, переборка; 2 - подволлок.

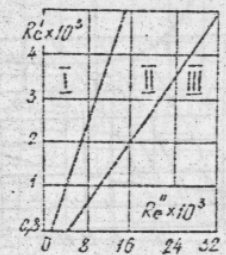


Рис. 13. Структурная диаграмма для вынужденного течения R 22 при режимах течения: I - расслоенном; II - волновом; III - полного омывания трубы.

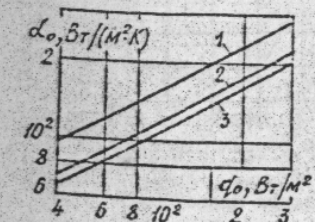


Рис. 14. График зависимости $\alpha_2 = f(q_2)$ при температурах кипения R 22, °C: 1 - от -37 до -39; 2 - от -41 до -43; 3 - от -44 до -46.

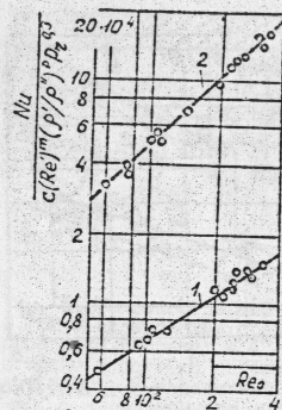


Рис. 15. График зависимости

при режимах течения R 22:
1-волновом;
2-полного омы-
вания трубы.

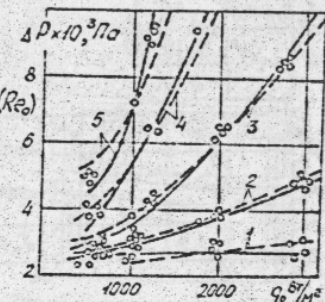
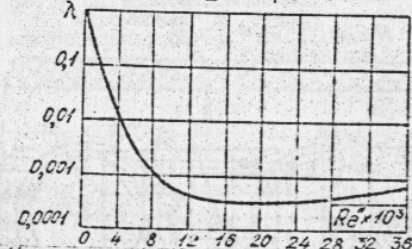


Рис. 16. График зависимости $\Delta P = f(G)$ при кратностях циркуляции R 22 ($t_0 = -45^\circ\text{C}$, труба 32x3 мм):
1-2-1; 2-2-2; 3-3-3;
4-4-4; 5-5-5;
6-6-6; 7-7-7;
8-8-8; 9-9-9;
экспериментальные дан-
ные; --- зависимость
Бо-Пьерре.

Рис. 17. График зависимости $\lambda = f(Re)$

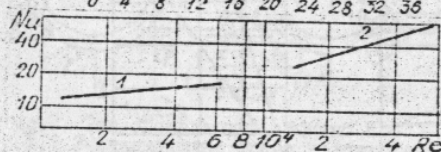


Рис. 18. График зависимости $Nu = f(Re)$ для щелевых каналов батарей ПСО при ламинарном (1) и турбулентном (2) режимах.

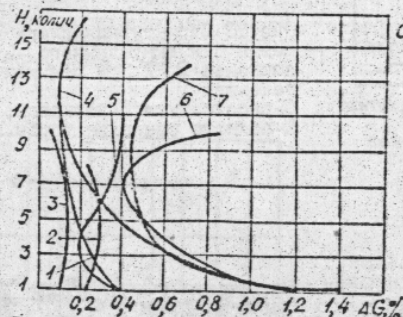


Рис. 19. Среднеобъемные потери массы груза по высоте штабеля.
а-трюм; б-твиндек; 1-ПСО, ППР "Алтай"; 2, 3-ПСО, ППР "Искона" (2-север-
ные широты, 3-тропические широты); 4-ГСО, ТР "Валентин Серов";
5, 6, 7-ВСО (5-РТМ "Ильичевск", 6-ПР "Ленинградская слава", 7-ТР
"Амурский залив").

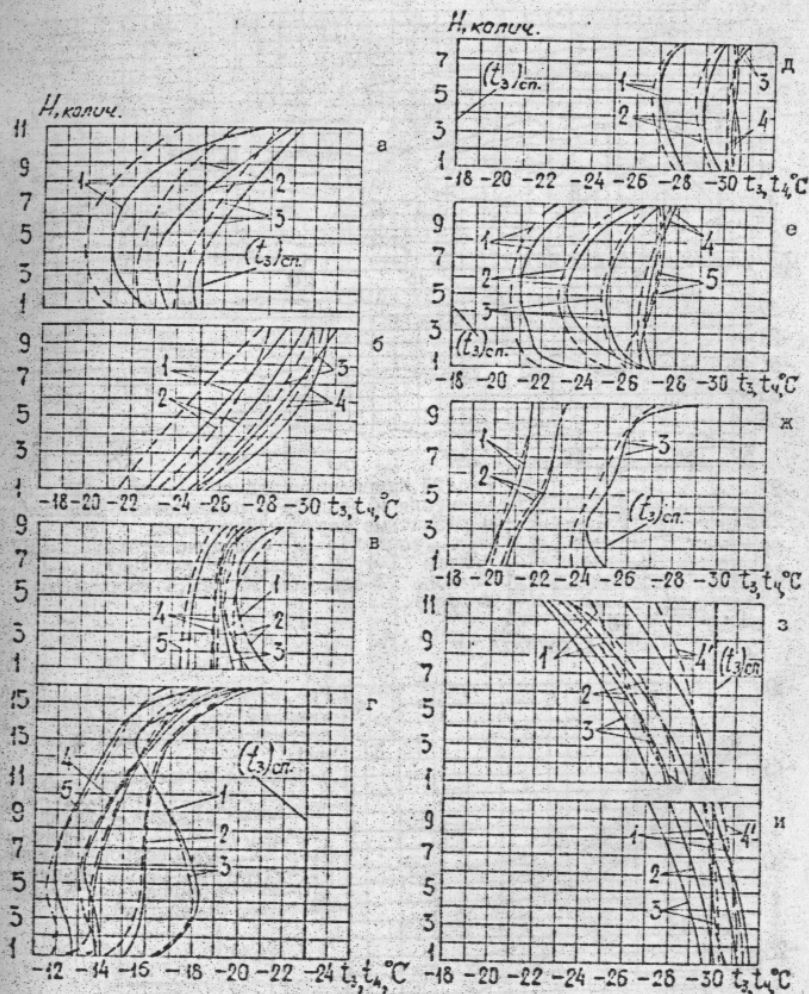
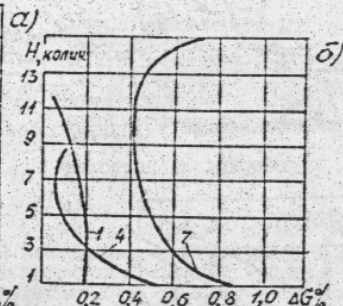


Рис. 20. Изменение средней температуры груза и воздуха по высоте охлаждаемых помещений в различные периоды испытаний.
— воздух; --- груз. 1-1 декада; 2-2 декада; 3-3 декада; 4-чет-
вертая декада; 5-второй месяц; 6-третий месяц.
а, б-ПСО, ППР "Алтай" (а-твиндек верхний, б-трюм); в, г-ГСО, ТР
"Валентин Серов" (в-твиндек, г-трюм); д, е-ПСО, ППР "Искона" (д-север-
ные широты, е-тропические широты); ж-ВСО, РТМ "Ильичевск"; з, и-ВСО,
ПБ "Ленинградская слава" (з-твиндек, и-трюм).

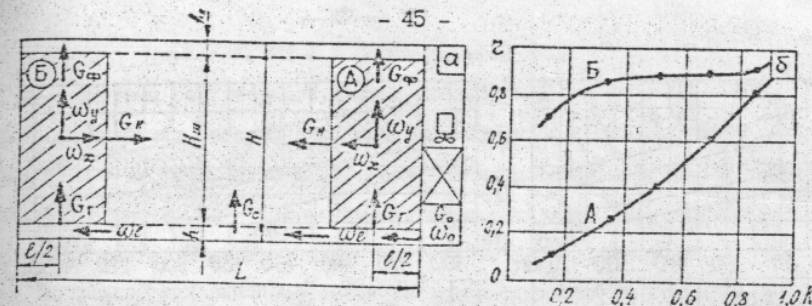
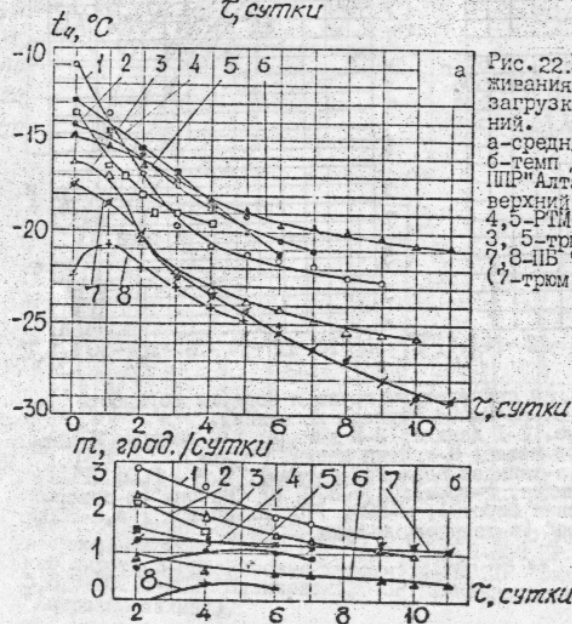
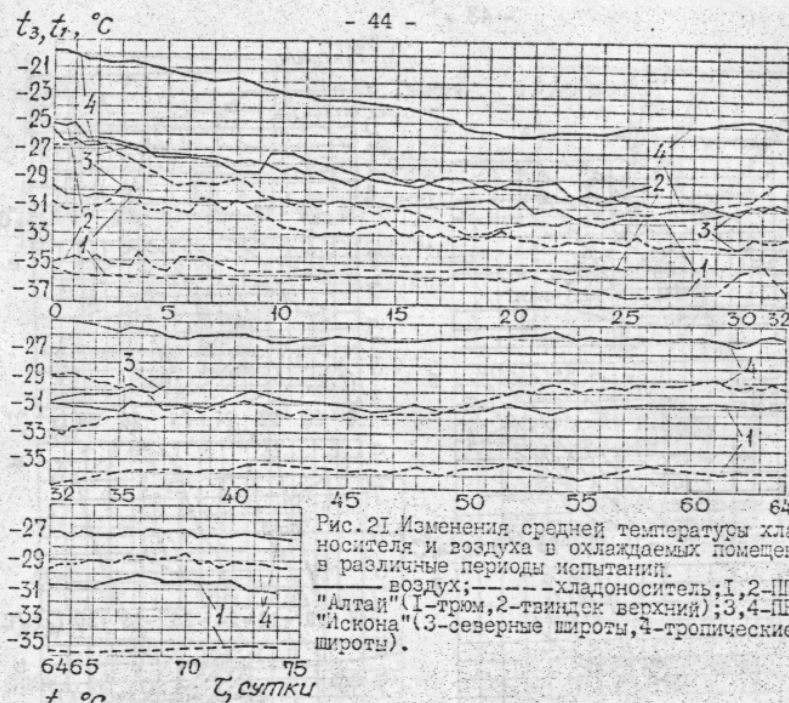


Рис. 23. Воздухораспределение в частично загруженных трюмах с БСО. а — физическая модель; б — график зависимости $Z = f(K)$; А, Б — штабель в начале и конце грузовой решетки.

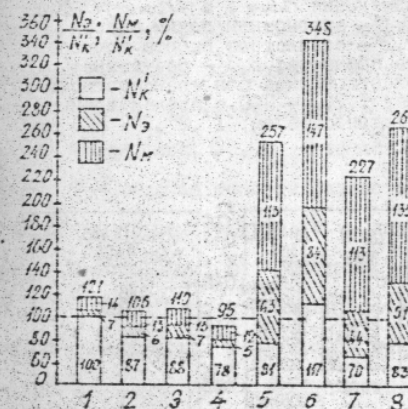


Рис. 24. Энергетические показатели СРТ. 1, 2 — ПСО (1 — однорядная, 2 — двухрядная); 3 — ПСО; 4 — ПСО; 5, 6, 7, 8 — БСО (5 — бесканальная, ПЛ, 6 — канальная, ПЛ, 7 — бесканальная, НК, 8 — канальная НК); N_k — мощность компрессора без учета теплотого эквивалента N_s работы механизмов; $N_{k'}$ — мощность механизмов.

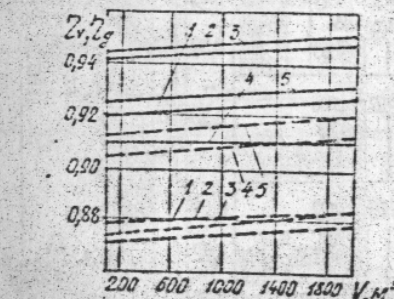


Рис. 25. График зависимости Z_g и Z_v от величины полезного объема трюмов. — Z_g ; — — — — — Z_v ; 1, 2, 3 — БСО (1 — ДР717, 2 — О, Р22, 3 — Д, Р22); 4, 5 — ПСО, Д, Р717 (4 — ПБ; 5 — НБ).

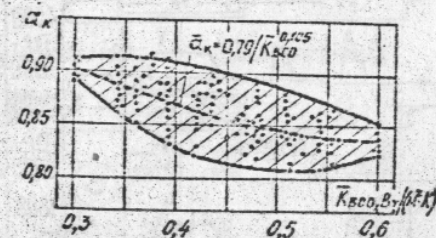
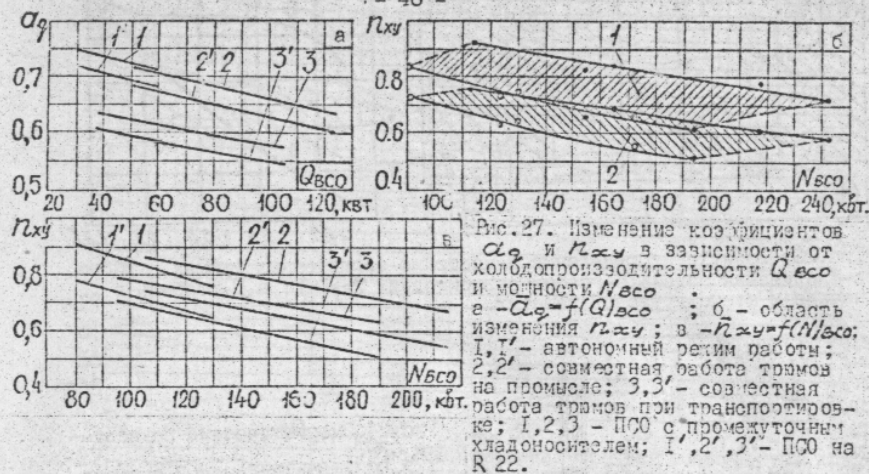


Рис. 26. Область изменения коэффициента α_k в зависимости от коэффициента теплопередачи ограждений трюмов с БСО.



СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

СРНТ - системы рефрижерации низкотемпературных трюмов; ПСО, ВСО, ПВСО - панельная, воздушная и панельно-воздушная системы охлаждения; ГСО, РСО - системы охлаждения, оборудованные гладкотрубными и ребристыми батареями; ПХ - промежуточный хладоноситель; НК - непосредственное кипение; ПЭ, НЭ - полное и неполное экранирование; D, D_0, D_3, D_r, D_s - составляющие водоизмещения: по грузовую марку, порожнего судна, дедвейт, полезная грузоподъемность, запасы; C - удельная теплоемкость; d, D - влагосодержание, коэффициент диффузии; E - коэффициент тепловой эффективности; F, f_v - площадь, удельная площадь поверхности на единицу объема; $G, \Delta G$ - масса, потеря массы; i - энтальпия; K - коэффициент теплопередачи, коэффициент приведения; Q, q - тепловой поток, плотность теплового потока; z - скрытая теплота фазового перехода; V - объем; w - скорость; t - температура; α - коэффициент теплоотдачи; β - коэффициент массоотдачи; δ - толщина; ϵ - коэффициент порозности; η - коэффициент изменения статического давления; λ - удельная теплопроводность; ξ - коэффициенты влаговыделения и аэродинамического сопротивления; ρ - плотность; τ - время; φ - относительная влажность; Nu, Pr, Ra, Re, We - числа Нуссельта, Прандтля, Рейлея, Рейнольдса, Вебера.

Индексы: к - комплексный; л - полезный; р - располагаемый; т - топливо; ху - холодильная установка.

В. К. К.

г.Одесса, роталпринт ОИМТЭ. Подписано к печати 30.01.92
Объем 3,0 п.л. Тираж 140. Заказ 185-92

