

На правах рукописи



ДАНГ ВАН ЛАЙ

**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
СИСТЕМЫ ДЛЯ БЫСТРОЙ ЗАМОРОЗКИ РЫБОПРОДУКТОВ**

Специальность 05.04.03. Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

- 3 НОЯ 2011

Москва 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет МЭИ» на кафедре Низких температур.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Лунин Анатолий Иванович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Нестеров Сергей Борисович
Кандидат технических наук
Савельев Евгений Геннадьевич

Ведущая организация ООО «ГП Холодильно – Инженерный
Центр»

Защита диссертации состоится « 11 » ноября 2011г. в 11³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.157.04 при ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ» по адресу: г. Москва, ул. Красноказарменная, 17, корп. Т, каф. ИТФ, ауд. Т-206.

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ». Автореферат диссертации размещен на сайте www.mpei.ru

Автореферат разослан «10» октября 2011г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н.



Ястребов А.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Среди разнообразия пищевых продуктов в условиях Социалистической Республики Вьетнам особо выделяются морепродукты. Это не только основной пищевой продукт СРВ, но и значительная статья экспорта. Актуальность работы связана с тем, что для создания высокоэффективных низкотемпературных морозильных камер для замораживания тунца в условиях Вьетнама на малых рыболовецких шхунах представляются целесообразным провести: анализ и выбор оптимальных значений температур быстрой заморозки рыбопродуктов и скоростей обдува продукта холодным воздухом; определение продолжительности замораживания при оптимальных режимах работы морозильной камеры; выбор типа высокоэффективного низкотемпературного оборудования; оптимизацию параметров и режимов работы морозильного агрегата; экспериментальное подтверждение результатов расчетов процессов замораживания креветок, пангасиуса и тунца; оптимизацию и выбор элементов низкотемпературного оборудования для малых Вьетнамских рыболовецких шхун.

Цель работы Разработка высокоэффективной низкотемпературной системы для быстрой заморозки рыбопродуктов.

Основные задачи исследования

- 1 - Обзор и анализ существующих способов замораживания рыбопродуктов.
- 2 - Выбор аналитических формул расчета коэффициента теплоотдачи и времени раздельного охлаждения и замораживания рыбопродуктов.
- 3 - Численное моделирование процесса замораживания рыбопродуктов.
- 4 - Сопоставление различных методик расчета времени замораживания рыбопродуктов.
- 5 - Выбор оптимального режима быстрой заморозки рыбопродуктов.
- 6 - Подбор и оптимизация состава смесового хладагента (как по качественному составу, так и по количественному) и давлений конденсации и испарения в цикле (проводится по максимальным значениям удельной холодопроизводительности q_0 и холодильного коэффициента ϵ_x).
- 7 - Экспериментальное получение энергетических характеристик низкотемпературных систем со смесовым хладагентом.
- 8 - Экспериментальное исследование процессов быстрой заморозки рыбопродуктов.

Научная новизна

1. Впервые получены аналитические формулы расчета коэффициента теплоотдачи и трехмерные графики зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры, скорости воздуха и размера продукта.
2. Впервые получены формулы расчета продолжительности замораживания рыбопродуктов по раздельному охлаждению и замораживанию.

3. Впервые проведено сопоставление различных методик расчета продолжительности замораживания морепродуктов.
4. Впервые применен метод эффективной теплоемкости с модификацией для моделирования процесса замораживания рыбопродуктов в потоке холодного воздуха при его скоростях в диапазоне 5...15 м/с.
5. Впервые получены экспериментальные данные основных процессных параметров замораживания креветок, пангасиуса и тунца.
6. Разработана программа для расчета характеристик выбранного компрессора по данным каталогов.

Практическая значимость работы

1 - Даны рекомендации по энергетически эффективному способу замораживания рыбопродуктов.

2 - Даны рекомендации оптимальных режимов быстрого замораживания рыбы.

3 - Рекомендована формула расчета коэффициента теплоотдачи и эффективной теплоемкости для моделирования процесса замораживания рыбопродуктов.

4 - Построены трехмерные графики прогнозирования продолжительности, скорости замораживания рыбопродуктов для температур охлаждающего воздуха в диапазоне от - 50...- 100 °С и при скоростях воздуха 1...15 м/с.

6 - Получены энергетические и расходные характеристики низкотемпературной системы с подобранным смесевым хладагентом, которые позволяют выбирать параметры низкотемпературных термокамер.

7 - Разработанная программа для ЭВМ позволяет рассчитывать энергетические и расходные характеристики конкретного компрессора по данным каталогов.

8 - Разработанная низкотемпературная система со смесевым хладагентом позволяет создать высокоэффективный комплекс для быстрого замораживания морепродуктов для малых рыболовческих шхун.

Автор выносит на защиту:

– результаты экспериментальных исследований процессов замораживания морепродуктов;

– результаты сопоставления времени замораживания креветок, пангасиуса и тунца, полученные расчетами по различным методикам с экспериментальными результатами;

– выбор оптимального режима заморозки рыбопродуктов.

Апробация работы Основные научные результаты были доложены и обсуждены на XVI Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, МЭИ, 2010); XVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, МЭИ, 24 – 25 февраля 2011); V Международной научно-технической конференции

«Вакуумная техника, материалы и технология» (г. Москва, КВЦ «Сокольники», 30 марта – 2 апреля 2010); VI Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» (г. Москва, Сокольники», 13 – 15 апреля 2011).

Публикации По результатам работы опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 2 тезиса докладов на конференциях.

Структура и объем диссертации Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 177 стр., включает 157 стр. основного текста, 60 рисунков, 16 таблиц, 107 литературных источников и 2 приложения на 20 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и сформулирована цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приведены необходимость быстрой заморозки тунцов в условиях малых рыболовецких шхун в Социалистической Республике Вьетнам; обзор и анализ существующих способов быстрого замораживания пищевых продуктов; перспективность использования новых, эффективных экологически безопасных низкотемпературных систем для увеличения скорости замораживания пищевых продуктов, обеспечивающей гарантированное сохранение их качества. Проанализированы также необходимые количества замораживаемого рыбопродукта в условиях малых рыболовецких шхун во Вьетнаме. Показано, что целесообразно проектировать морозильную камеру на максимальную одновременную вместимость рыбы $E = 60$ кг.

Во второй главе приведены рассчитанные значения и графики (рис. 1) коэффициентов теплоотдачи α в зависимости от температуры $t_{cp} = -50 \dots -100$ °С и скорости низкотемпературного воздуха $w = 1 \dots 25$ м/с.

Аналитическая формула расчета коэффициента теплоотдачи :

$$\alpha = \frac{191w^{0,80}}{d_{экв}^{0,2} \cdot (150 + T)^{0,37} \cdot T^{0,307}}, \quad (1)$$

где $d_{экв}$ - эквивалентный диаметр рыбопродукта, м.

Полученные данные показали, что коэффициент теплоотдачи не сильно зависит от размера рыбопродукта при скорости воздуха меньше 5 м/с.

Приведены аналитические формулы расчета продолжительности замораживания рыбопродукта в форме эквивалентного неограниченного цилиндра на основании упрощенной модели, в которой процесс замораживания разбивается на три стадии и продолжительность каждой стадии определяется рекомендованными формулами:

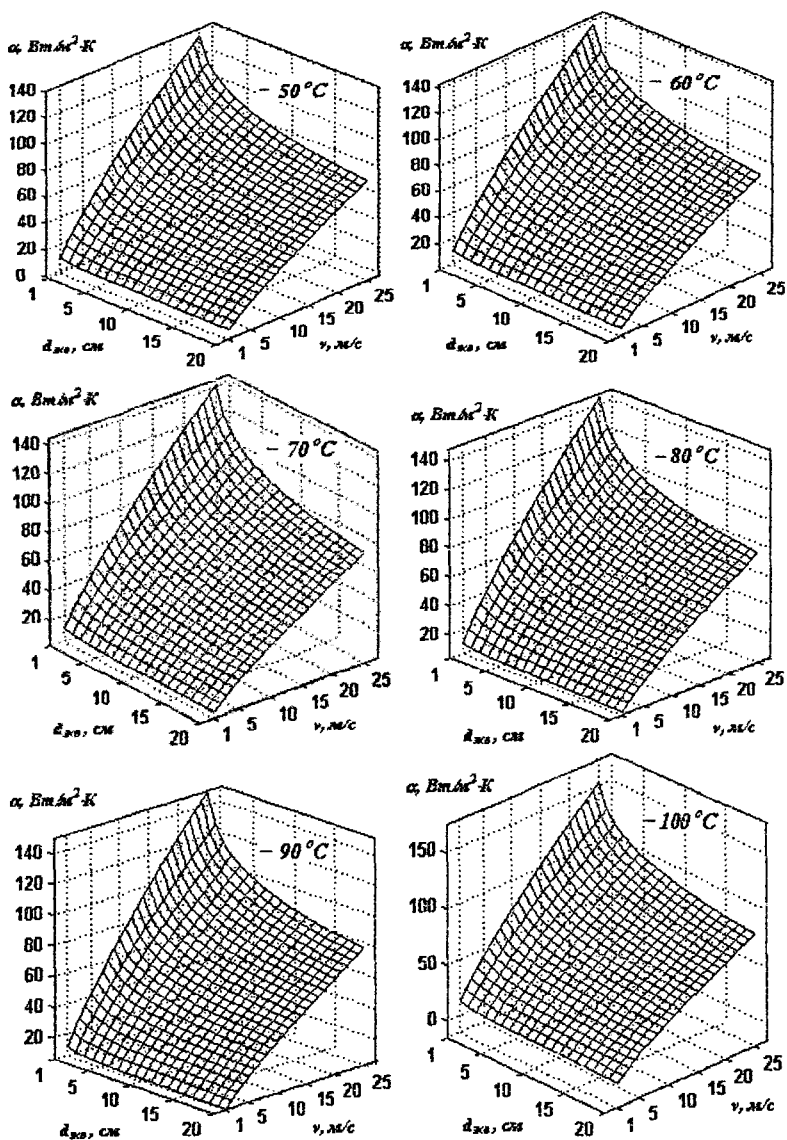


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от размера рыбы, температуры и скорости воздуха.

$$\tau_1 = \frac{\rho_0 r_0 c_0}{2\alpha} \ln \frac{t_w - t_{sp}}{t_{sp} - t_{sp}} \quad (2)$$

$$\tau_2 = \frac{\rho_0 g_1 \omega r_n r_0^2}{4\lambda (t_{sp} - t_{sp})} \left(1 + 2 \frac{\lambda}{\alpha r_0} \right) \quad (3)$$

$$\tau_3 = \frac{r_0^2}{\mu_1^2 a} \ln \frac{A_1 (t_{кр} - t_{sp})}{t_{кон} - t_{sp}} \quad (4)$$

A_1, μ_1 - коэффициенты выбираются в зависимости от числа Bi .

Количество вымороженной воды при замораживании определяется по формуле Miles (1974 г.):

$$\omega = \left(1 - \frac{0,4 \cdot b}{g_1} \right) \left(1 - \frac{t_{sp}}{t} \right) \quad (5)$$

Здесь: b, g_1 - массовая доля белка (протеина) и воды в продукте, соответственно, %;

r_0 - радиус цилиндра, м; r_n - удельная теплота кристаллизации воды, Дж/кг;

$t_{кр}, t_n, t_{кон}, t_{sp}$ - криоскопическая, начальная, конечная температуры и температура среды, °C, c_0 - удельная теплоемкость свежей рыбы, Дж/(кг·K); ρ_0 - плотность цилиндра (свежей рыбы), кг/м³; λ - коэффициент теплопроводности замороженной рыбы, Вт/(м·K).

Далее для моделирования процесса замораживания продукта сложной геометрической формы был применен расчетный комплекс Comsol Multiphysics 3.3. на основе нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности Фурье с учетом фазового перехода:

$$\rho(T) c_{p,eff}(T) \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = \nabla(\lambda(T) \nabla T), \quad (6)$$

где теплопроводность, теплоемкость и плотность продукта: $\lambda(T) = \lambda_0 + \Delta \lambda \omega$, Вт/(м·K); $c_p(T) = c_0 - 2100 g_1 \omega$, Дж/(кг·K), $\rho(T) = \rho_0 / (1 + \Delta \rho \omega)$ кг/м³.

Теплота фазового перехода, выделяемая при льдообразовании, учитывается как дополнительная теплоемкость и так называемая эффективная теплоемкость (метод эффективной теплоемкости с модификацией), определяемая как:

$$c_{p,eff}(T) = c_0 - 2100 g_1 \omega - \frac{r_n (g_1 - 0,4b) t_{sp}}{t^2} \quad (7)$$

Начальное условие: $T_{\tau=0} = T_n = const$. (8)

Граничное условие третьего рода на поверхностях: $n(-\lambda \nabla T) = \alpha(T - T_{sp})$, (9)

где n - единичный нормальный вектор к поверхности теплообмена.

В этой главе также приведен поиск оптимальных значений температур быстрого замораживания и скоростей обдува рыбопродуктов холодным воздухом. Анализ полученных графиков показал, что скорость и время замораживания наиболее

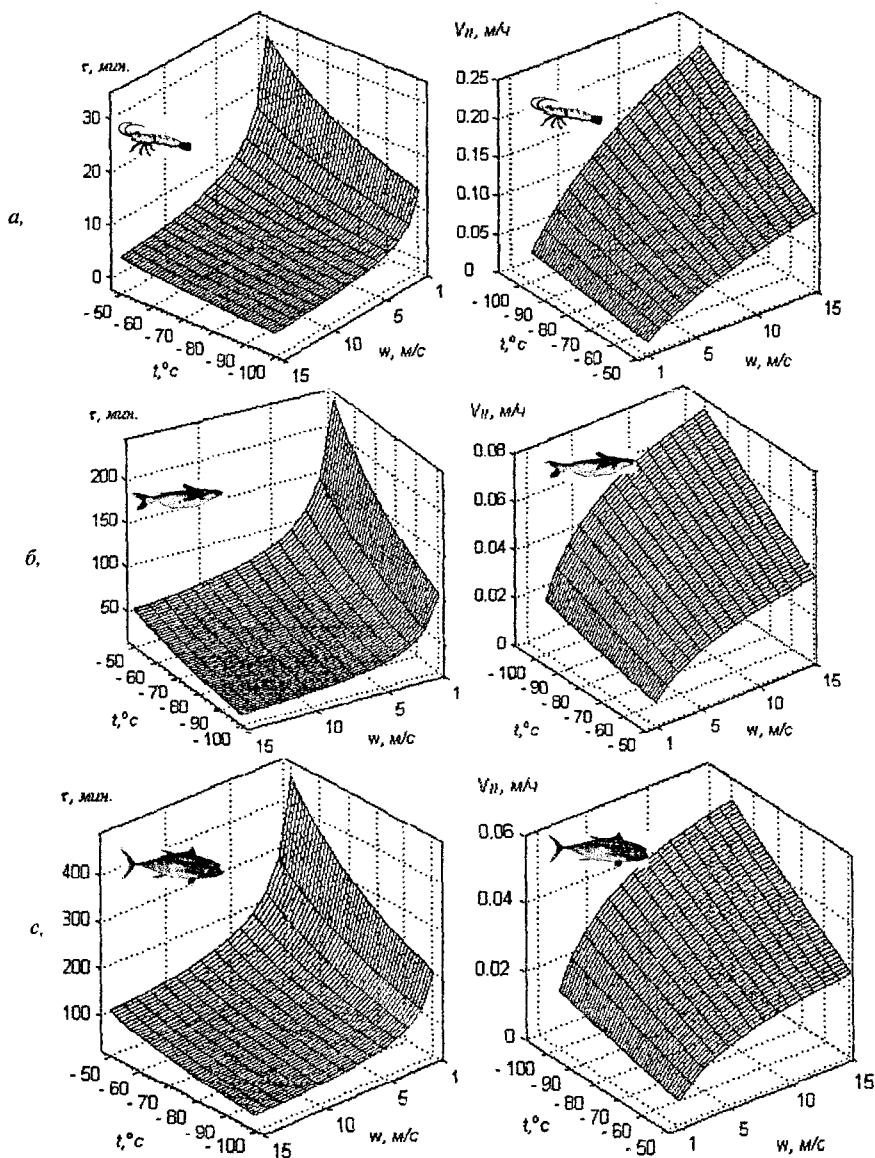


Рис. 5. Зависимость времени $\tau = f(w, t)$ и $V_{II} = f(w, t)$ скорости замораживания от температуры и скорости низкотемпературного воздуха. а – креветки; б – пангасиус; с – тунец.

резко изменяются при снижении температуры воздуха до -70°C и увеличении его скорости до 5 м/с (рис. 2). Эти значения были выбраны на первом этапе для разработки низкотемпературной системы охлаждения.

Для сопоставления теоретического расчета продолжительности замораживания рыбопродукта с экспериментом во второй главе рассмотрены семь различных методик:

Автор	Формула
Планк (1931)	$\tau = \frac{q\rho}{t_{xp} - t_{cp}} \left[\frac{P\delta}{\alpha} + \frac{R\delta^2}{\lambda} \right]$
Hung and Thompson (1983г.)	$\tau = \frac{\Delta H_{18}}{E \cdot \Delta t} \left[\frac{P\delta}{\alpha} + \frac{R\delta^2}{\lambda} \right]$
Cleland and Earle (1984г.)	$\tau = \frac{\Delta H_{18}}{E \cdot \Delta t} \left[\frac{P\delta}{\alpha} + \frac{R\delta^2}{\lambda} \right] \left[1 - \frac{1.65 Ste}{\lambda} \ln \left(\frac{t_{кон} - t_{cp}}{t_{18} - t_{cp}} \right) \right]$
Pham, Q.T. (1986г.)	$\tau = \frac{V}{E \cdot F \alpha} \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta t_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta t_2} \right) \left(1 + \frac{Bi}{4} \right)$
Рютов Д.Г (1936)	$\tau = \tau_{Планк} \left[1 + R_p(t_n - t_{xp}) \right] + \frac{n}{a\pi^2} \left(\ln \frac{t_{xp} - t_{cp}}{t_{кон} - t_{cp}} - 0,21 \right) \delta \left(\delta + \frac{4\lambda}{\alpha} \right)$
По раздельному охлаждению и замораживанию.	$\tau_1 = \frac{\rho_0 r_0 c_0}{2\alpha} \ln \frac{t_n - t_{cp}}{t_{xp} - t_{cp}} ; \tau_2 = \frac{\rho_0 g_1 \omega r_0^2}{4\lambda (t_{xp} - t_{cp})} \left(1 + 2 \frac{\lambda}{\alpha r_0} \right)$ $\tau_3 = \frac{r_0^2}{\mu_1^2 a} \ln \frac{A_1(t_{xp} - t_{cp})}{t_{кон} - t_{cp}} ; \tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$
Метод эффективной теплоемкости с модификацией	$\rho(T) c_{p,eff}(T) \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = \nabla(\lambda(T) \nabla T) ; \lambda(T) = \lambda_0 + \Delta \lambda \omega ;$ $\rho(T) = \rho_0 / (1 + \Delta \rho \omega) ; c_{p,eff}(T) = c_0 - 2100 g_x \omega - \frac{r_x (g_x - 0,4b) t_{xp}}{t^2}$

Результаты расчета представлены в следующей таблице.

В связи с результатами расчетов представляется целесообразным проведение в дальнейшем качественного эксперимента по определению времени замораживания.

Вид рыбо-продуктов	Время замораживания τ , с							
	Планк	Hung, Thompson	Cleland, Earle	Pham Q.T	Рютов Д.Г	Раздельное охлаждение, замораживание	Расчет по эффективной теплоемкости с модификацией	Максимальное расхождение
Креветка $d_{экв} = 12$ мм	248	356	356	362	291	341	330	14,2 %
Пангасиус $d_{экв} = 60$ мм	2210	2638	2638	2845	2567	2971	2950	6,6 %
Тунец $d_{экв} = 200$ мм	12030	12758	12758	13740	13921	16703	17660	21,0 %

В третьей главе проведен анализ энергетических характеристик существующих низкотемпературных парокомпрессорных циклов для замораживания рыбопродуктов.

Для получения более низких температур ($-50...-100$ °С) необходимо переходить к двухступенчатым или каскадным циклам. Другим, перспективным способом для решения этих задач служит применение многокомпонентных рабочих тел (МРТ) – смесевых хладагентов. Оптимизация состава смесового хладагента (как по качественному составу, так и по количественному) и давлений в цикле обычно проводится по максимальным значениям удельной холодопроизводительности q_0 и холодильного коэффициента ϵ_x . Многочисленные результаты таких оптимизаций показывают, что возможно создать низкотемпературные установки со смесевыми хладагентами с высокой энергетической эффективностью на уровне, а зачастую и выше каскадных схем. При этом используется один серийный одноступенчатый холодильный компрессор.

Вывод: Для малых рыболовческих шхун, максимальное время добычи которых 6 месяцев в год, применение одноконтурной низкотемпературной установки, работающей на смесевых хладагентах для быстрого замораживания пищевых продуктов с точки зрения энергетической и экономической эффективности целесообразно.

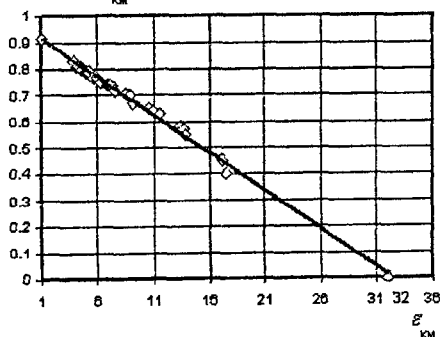
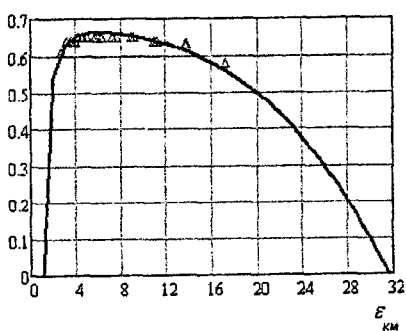
В четвертой главе проведен подбор оптимального значения состава и давлений прямого и обратного потоков для низкотемпературных установок при $p_m = 2,0$ МПа, $p_n = 0,3$ МПа и температуре окружающей среды 303 К (30 °С):

№ смеси	Мольный состав, %	Температура охлаждения, T_0 , К	Холодопроизводительность, $q_0^{см}$, кДж/кмоль	Требуемая мощность компрессора, $I_{см}$, кДж/кмоль	Эксергетический КПД криоблока, %
1	Ar/R14/R23 /R134a/R123 0,5/37,5/36/8,5/7,5	203	4686,53	3691,48	0,63
2	Ar/R14/R23 /R134a/R123 8/49/19/9,5/14,5	173	3172,15	3925,25	0,61

В четвертой главе разработан алгоритм и составлена программа для расчета энергетических и расходных характеристик выбранного компрессора по данным каталогов.

$$\eta_s = 0.653 + 0.273 \cdot \varepsilon_{км}^{-1} - 1.06 \cdot \varepsilon_{км}^{-2} - 2.092 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon_{км}^2$$

$$\lambda = -0.0291 \varepsilon_{км} + 0.9454$$



а,

б,

Рис. 3. Характеристики компрессора 4СС- 6,2(У).

а – коэффициент подачи; б – адиабатный КПД компрессора.

В пятой главе проведены экспериментальные исследования процесса замораживания рыбпродуктов, а также получены энергетические характеристики низкотемпературной системы со смесевым хладагентом.

Приципиальная схема стенда для испытаний представлена на рис. 3. Низкотемпературная установка, работающая на пятикомпонентном хладагенте, позволяет получать температуру в термокамере вплоть до -110 °С. Это дает возможность проводить испытания по сверхбыстрому замораживанию различных объектов. Кроме этого, в установке предусмотрена возможность изменения скорости охлаждающего воздуха в широком диапазоне: от 1 до 15 м/с.

Температура во всех указанных на схеме точках измеряется хромель-копелевыми термопарами, “нулевые” спаи которых находятся на массивной медной подкладке, температура которой контролируется термометром

сопротивления. Чувствительность термопар в рабочем диапазоне температур $S \pm 0.06 \text{ мВ/ } ^\circ\text{C}$, поэтому для требуемой точности погрешность измерения разности потенциалов должна быть меньше $\pm 6 \text{ мкВ}$.

Давление в указанных на схеме точках определяется при помощи тензорных датчиков давления по выходному электрическому сигналу. Максимальное выходное напряжение составляет 80% от напряжения питания датчиков 6.8 В (т.е. примерно 5В). Погрешность измерения абсолютного давления на всасывающей линии компрессора не превышает $\pm 1\%$, а в других точках $\pm 2\%$.

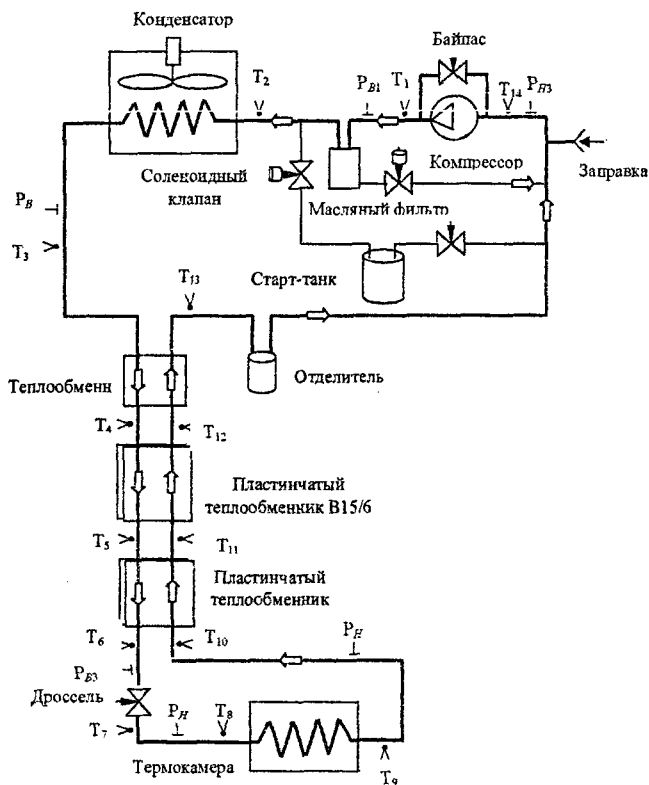


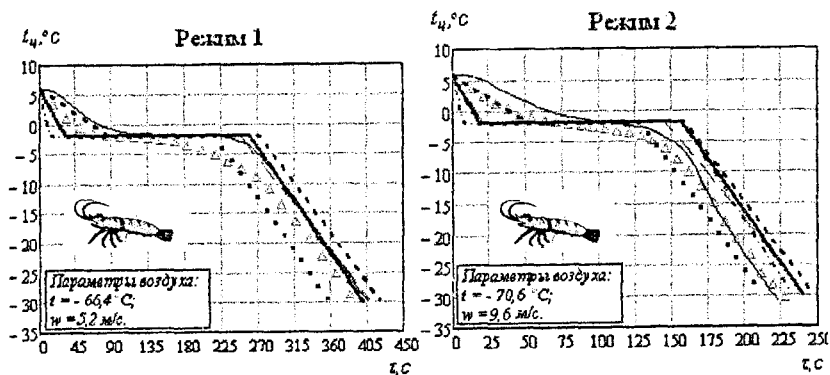
Рис. 3. Принципиальная схема стенда для быстрого замораживания.

Полученные в результате экспериментальных исследований данные значений времени замораживания креветок при различных режимах и сопоставляются с расчетными данными в таблице:

Методика	Креветки, $d_{\text{экв}} = 12 \text{ мм}$											
	Режим 1		Режим 2		Режим 3		Режим 4		Режим 5		Режим 6	
	$\tau, \text{с}$	D	$\tau, \text{с}$	D	$\tau, \text{с}$	D	$\tau, \text{с}$	D	$\tau, \text{с}$	D	$\tau, \text{с}$	D
Эксперимент	393		228		207		256		152		144	
Планк	315	-24,8	190	-20,0	163	-27,0	210	-21,9	130	-16,9	118	-18,1
Hung, Thompson	359	-9,5	213	-7,0	184	-12,5	228	-12,3	134	-13,4	124	-13,9
Cleland, Earle	412	4,6	243	6,2	211	1,9	257	0,4	151	-0,7	140	-2,8
Pham Q,T	423	7,1	248	8,1	210	1,4	278	7,9	167	9,0	150	4,2
Рютов Д.Г	399	1,5	233	2,1	204	-1,5	235	-8,9	142	-7,0	134	-6,9
Раздельное охлаждение и замораживание	401	2,0	241	5,4	208	0,5	264	3,0	163	6,7	149	3,5
Эффективная теплоемкость с модификацией	408	3,7	220	-3,6	212	2,4	264	3,0	153	0,7	146	1,4

D - Погрешность с экспериментом, %

Для исследования отклонения температуры центра тела рыбы от положения креветок в термокамере проводилось одновременно замораживание более 2 креветок. Анализ показывает, что при замораживании одновременно нескольких креветок их конечная температура в центре отклоняется до 19 %.



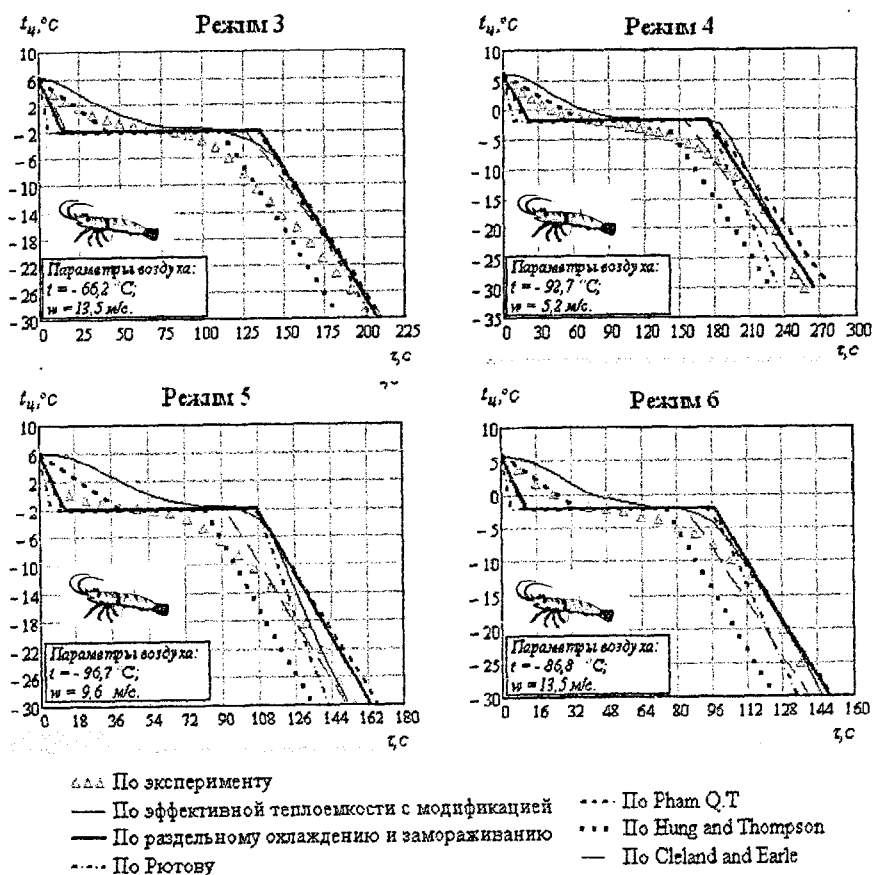


Рис. 4. Сопоставление различных методик расчета времени заморозки креветок с экспериментом.

Далее для пангасиуса и филейной части тунца при замораживании до температуры в центре -30°C проведены сопоставления экспериментальных и расчетных данных по Comsol Multiphysics 3.3 Результаты представлены в следующих таблицах:

Результаты сопоставления расчетных данных по Comsol Multiphysics 3.3 с экспериментом при замораживании пангасиуса $d_{экв.} = 60$ мм.

№ термо-пары	Температура пангасиуса, °С											
	Режим 1		Режим 2		Режим 3		Режим 4		Режим 5		Режим 6	
	СМ	Эксперимент	СМ	Эксперимент	СМ	Эксперимент	СМ	Эксперимент	СМ	Эксперимент	СМ	Эксперимент
15	-43,3	-45,7	-47,2	-45,6	-40,8	-40,1	-54,4	-52,2	-49,9	-51,4	-57,3	-55,6
16	-37,4	-37,1	-33,4	-35,1	-32,9	-37,2	-50,5	-49,8	-42,8	-47,9	-47,5	-51,1
17	-56,5	-57,2	-51,9	-55,7	-49,5	-55,7	-74,5	-78,2	-58,6	-65,9	-74,2	-76,7
18	-30	-30	30	30	-30	-30	-30	-30	30	30	-30	-30
Время, мин.	46,3	48,1	32,2	31,4	29,7	30,3	39,2	40,8	25,4	26,8	20,7	22,5

Результаты сопоставления расчетных данных по Comsol Multiphysics 3.3 с экспериментом при замораживании филейной части тунца $d_{экв.} = 90$ мм.

Термо-пара	Температура филейной части тунца, °С									
	Режим 1		Режим 2		Режим 3	Режим 4		Режим 5		Режим 6
	СМ	Эксперимент	СМ	Эксперимент	Появление глубоких разрывов филейной части тунца	СМ	Эксперименту	СМ	Эксперименту	Появление глубоких разрывов филейной части тунца
15	-40,5	-40,6	-40,5	-42,5		-45,4	-40,2	-47,3	-46,4	
16	-43,2	-43,9	-51,5	-46,3		-56,7	56,2	-63,6	-60,7	
17	-36,5	-36,6	-43,5	-40,7		-40,5	-31,7	-42,4	-40,9	
18	-30	-30	30	30		-30	-30	-30	-30	
Время, мин.	81,4	78,1	70,3	62,5	70,6	69,1	57,2	53,3		

СМ - Comsol Multiphysics 3.3

Графики сопоставления расчетных данных с экспериментом изменения температур в различных точках пангасиуса и филейной части тунца по времени при замораживании до температуры -30 °С в центре тела представлены в рис.5 и 6:

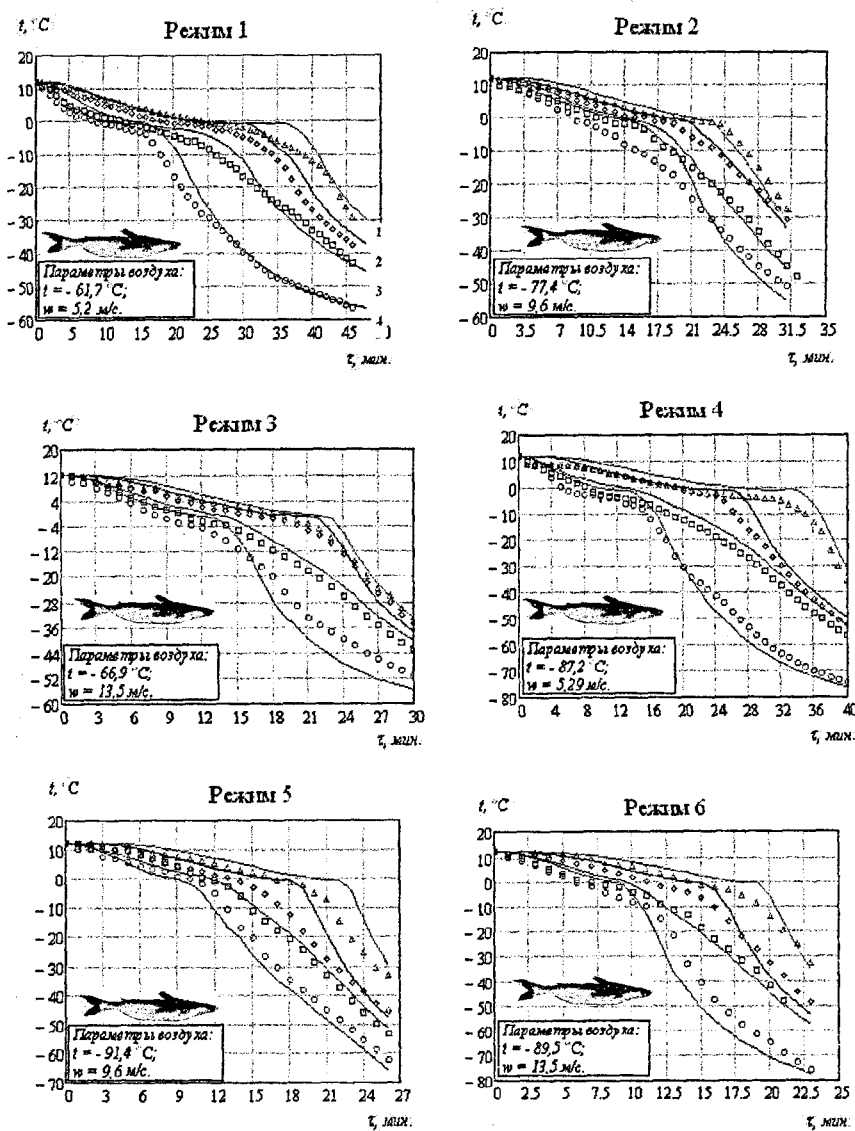


Рис. 5. Сопоставление расчета времени замораживания пангасиуса и распределения температур по Comsol Multiphysics 3.3 с экспериментом.

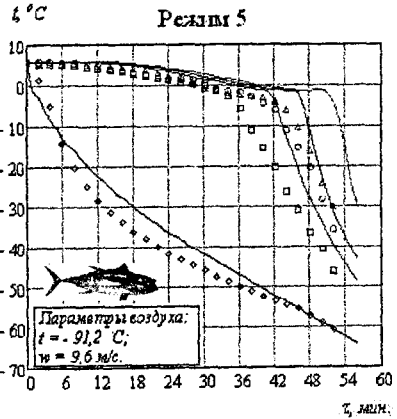
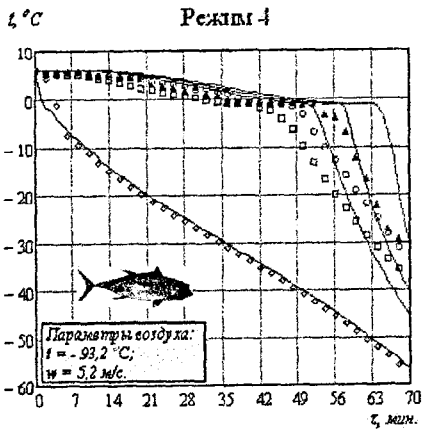
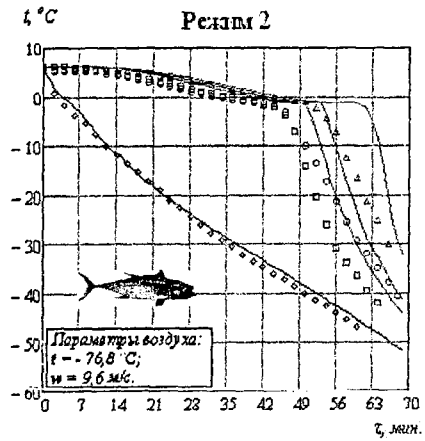
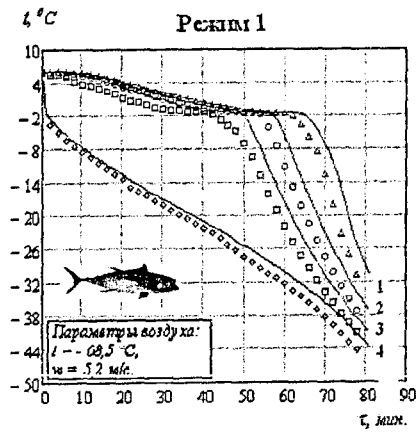


Рис. 6. Сопоставление расчета времени замораживания филейных частей тунца и распределения температур по Comsol Multiphysics 3.3 с экспериментом. Сплошные линии – расчет по Comsol Multiphysics 3.3; точки – по экспериментам.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для расчета времени замораживания рыбопродуктов можно применять эквивалентное тело.
2. Разработанные формулы по отдельному охлаждению и замораживанию отклоняются от экспериментов до 7 %.
3. Самым точным методом расчета времени замораживания рыбопродуктов является метод эффективной теплоемкости с модификацией.
4. Разработанная низкотемпературная система, работающая на смесевых хладагентах в интервале температур: $-70 \dots -100$ °C и скорости воздуха 5...15 м/с, может обеспечить процесс быстрого замораживания рыбопродуктов на малых рыболовецких шхунах с высокими энергетической и экономической эффективностью.
5. Для крупных рыб (как тунец) ограничивается скорость воздуха до 10 м/с, так как при увеличении скорости воздуха до 15 м/с в филейной части тунца появляются глубокие разрывы.
6. При одинаковой температуре воздуха увеличение скорости воздуха в интервале от 5,2 до 13,5 м/с приводит к сокращению продолжительности замораживания для креветок до 47,3 % ; для пангасиуса до 44,9 %. Для филейной части тунца до 22,9 % при изменении скорости от 5,2 до 9,6 м/с.
7. При одинаковой скорости воздуха снижение температуры воздуха в интервале от -70 до -100 °C так же сокращается время замораживания: для креветок до 34,9 %; для пангасиуса до 24,8 % и для филейной части тунца до 14,7 %.
8. Отклонение расчета распределения температур по телу рыбопродукта от экспериментальных данных при замораживании до температуры -30 °C в центре тела по Comsol Multiphysics 3.3 составляет до 11,5 %.
9. При замораживании одновременно нескольких креветок, их конечная температура в центре тела различна и отклоняется до 19 %.
10. Для рыб диаметром больше 60 мм, таких как пангасиус или филейной части тунца при быстром замораживании целесообразно заканчивать процесс замораживания при достижении конечной температуры продукта в центре -6 °C, определяющей основной процесс льдообразования и при этом температура на поверхности рыб достаточно низкая, чтобы в процессе выравнивания температур обеспечить среднеобъемную температуру -18 °C в центре, необходимую для дальнейшего холодильного хранения продукта. В этом случае время замораживания сокращается до 14 %.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Данг Ван Лай, Луинин А.И. Продолжительность заморозки морепродуктов в условиях Вьетнама. Тезисы докладов XVI Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 103 - 105.

2. Лунин А.И., Данг Ван Лай, Ромашов М.А. Энергетически эффективный способ замораживания пищевых продуктов. V Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология». М.: НОБЕЛЛА. 2010. С. 232 – 236.

3. Лунина А.И., Ромашов М.А., Данг Ван Лай. Оптимизация пускового периода дроссельных низко-температурных систем со смесевыми хладагентами. V Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» М.: НОБЕЛЛА. 2010. С. 237 – 242.

4. Лунин А.И., Данг Ван Лай, Ромашов М.А. Сопоставление методов расчета быстрого замо-раживания рыбопродуктов // Холодильная техника, № 8, 2010, с. 48 - 51.

5. Лунина.А.И., Ромашов М.А, Коваленко В.Н., Данг Ван Лай. Дроссельная низкотемпературная система со смесевыми хладагентами // Химическое и нефтегазовое машиностроение, № 9, 2010, с. 25 - 27.

6. Данг Ван Лай, Лунин А.И. Численное моделирование процесса замораживания морепродуктов. XVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 86 - 88.

7. Лунин А.И., Данг Ван Лай, Ромашов М.А. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по низкотемпературному замораживанию рыбопродуктов. VI Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» М.: НОБЕЛЛА. 2011. С. 77 – 81.

8. Лунин А.И., Ромашов М.А., Данг Ван Лай. Характеристики дроссельных низкотемпературных систем со смесевым хладагентом при изменении температуры окружающей среды. VI Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» М.: НОБЕЛЛА. 2011. С. 74– 76.

9. Лунин А.И., Данг Ван Лай, Ромашов М.А. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по низкотемпературному замораживанию рыбопродуктов // Холодильная техника, № 7, 2011, с. 48 - 52.

6

Подписано в печать 4.7.2011 Заказ 316 Тираж 100 П.л. 1,25
Полиграфический центр ФГБОУВПО «НИУ МЭИ»
Красноказарменная ул., д. 13