

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА**

На правах рукописи

ГРАЙЗИ ЖАМИЛЬ АФИФ

ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЫБ И РЫБОПРОДУКТОВ

Специальность **05.18.14**-Хранение и холодильная технология
пищевых продуктов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1997

064.8

ЛННБ України ім.В.Стефаніка

Работа выполнена в Одесской Государственной Академии Пищевых Технологий



00753838 (Y)

Научный руководитель - кандидат технических наук, профессор В.П. Онищенко

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор В.А. Загоруйко
- кандидат технических наук Д.Н. Ильинский

Ведущая организация - Одесская Государственная Академия Пищевых Технологий

Защита состоится "28" апреля 1997 г. в 11 часов на заседании специализированного Совета Д.05.20.01 при Одесской Государственной Академии Холода по адресу: 270100, г. Одесса, ул. Дворянская, 1/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОГАХ.

Автореферат разослан "24" марта 1997 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
д.т.н., профессор

В.А. Календерьян

Исх. №

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Рыба и рыбопродукты являются важными компонентами питания человека, источником биологически ценных веществ, наименее опасны с точки зрения развития онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний. Охлаждение, замораживание, последующее холодильное хранение и транспортировка являются главными составными процессами первичной переработки рыб с целью сохранения их исходного качества, биологической ценности. Однако, наряду с разнообразием способов холодильной обработки и хранения, в настоящее время холодильная обработка и хранение недостаточно стандартизированы как по видам рыб и рыбопродуктов, так и по конечным характеристикам достигаемых температурных полей, интенсивности охлаждения или замораживания, протекающих биохимических реакций в процессах холодильной обработки, хранения, последующего размораживания. Последние существенным образом определяют качество рыбопродуктов, готовых к употреблению, их роль в питании и здоровье человека.

С другой стороны, кинетика биохимических реакций определяется достигаемыми уровнями кристаллизации воды, температурными полями и тепловыми потоками на тех или иных временных интервалах. Поэтому поиск оптимальных холодильных технологий для сохранения исходного качества рыбного сырья не может быть проведен без предварительного математического моделирования процессов холодильной технологии, охватывающего все разнообразие способов и технических средств холодильной обработки, хранения, размораживания.

Имеющиеся в мировой научно-технической литературе результаты исследований Венгер К., Гинзбурга А., Ионова А., Конокотина Г., Лобзина П., Фикинина А., Чижова Г., Dickerson R., Cleland D., Kamhar B., Katayama K., Levin D., Lorentzen G. и их научных школ, других авторов отражают чаще температурные поля в теле рыб и рыбопродуктов для конкретных условий экспериментов. Обобщение экспериментальных результатов проведено только по временной длительности процессов охлаждения, замораживания, размораживания в рамках известной формулы Планка для процессов намораживания льда из чистой воды. Изменение температурных полей и тепловых потоков в процессах замораживания и размораживания по сути почти не исследовано. Необходимое в решении этих задач знание температурной зависимости теплофизических свойств (ТФС) различных рыб, динамики кристаллизации и таяния льда в широком диапазоне температур не достигнуто, а ТФС рыб и рыбопродуктов в процессах их размораживания в литературе вовсе отсутствуют. Поэтому математическое моделирование ТФС, температурных полей, тепловых потоков, доли вымороженной воды в различных рыбах и различных процессах охлаждения, замораживания и размораживания представляется необходимым на пути дальнейшего расчетно-теоретического анализа изменений качества рыбного сырья.

Целями и задачами настоящей работы являются:

- разработка методики прогнозирования и таблиц ТФС (эффективная теплоемкость, плотность, теплопроводность, доля вымороженной воды) различных видов рыб в широком диапазоне температур и начальных влажностных значений. При этом необходимо учесть гистерезис формирования значений доли

- вымороженной воды при осуществлении процессов замораживания-размораживания;
- разработать математическую модель процессов охлаждения, замораживания и размораживания рыб как тел неправильной геометрической формы в различных охлаждающих средах, с учетом сильной зависимости ТФС от температуры;
- разработать численный алгоритм решения уравнений математической модели, обеспечивающий вычисление температурных полей, тепловых потоков, среднеэнтальпийных температур в различные моменты времени протекания процессов охлаждения, замораживания и размораживания;
- провести апробацию методики прогнозирования ТФС, математической модели путем сравнения расчетных величин с экспериментальными данными для отдельных видов рыб и рыбопродуктов, в различных процессах их холодильной обработки и размораживания.

Научную новизну и научные результаты работы составляют:

- для двадцати шести видов рыб и рыбопродуктов получены впервые зависимости для ТФС "сухой" компоненты в диапазоне температур от минус 40 до 30 °С, которые в сочетании с аналогичными зависимостями для воды, льда, воздуха позволили описать ТФС рыб и рыбопродуктов с погрешностью, не выше погрешностей экспериментальных данных различных авторов, как в процессах замораживания, так и в процессах размораживания;
- разработан алгоритм расчета и представлены подробные таблицы для ТФС рыб и рыбопродуктов как в процессах замораживания, так и в процессах размораживания. Они рекомендуются для практического использования в отрасли переработки рыбного сырья;
- разработана математическая модель и реализующий ее численный алгоритм для вычисления всех необходимых характеристик процессов замораживания и размораживания рыб и рыбопродуктов в различных средах. Математическая модель представляет собой нелинейную нестационарную краевую задачу теплопроводности с граничными условиями второго и третьего рода, а также с интерполяционным параметром, который отражает соотношение между теплообменной поверхностью, объемом и характерным размером рыб и рыбопродуктов;
- проведена апробация (сравнение расчетных и экспериментальных величин) математической модели по температурным полям, тепловым потокам, длительности процессов замораживания и размораживания для девяти видов рыб и рыбопродуктов, а также по длительности процессов замораживания и размораживания модельных тел (шар, конечный цилиндр, конечная пластина, яйцо, пирамида, рыба) из синтетического вещества - тилозы, строго заданного состава. Это позволяет рекомендовать разработанные математическую модель и ее алгоритм для проведения дальнейших исследований и разработки систем контроля процессов холодильной обработки и размораживания рыб и рыбопродуктов.

На основе полученных научных результатов сформулировано и обосновано **научное положение**:

гистерезис значений доли вымороженной воды в процессах замораживания и размораживания пищевого сырья существенным образом определяет различие в закономерностях формирования температурных полей, тепловых потоков. Дальнейшее развитие процессов холодильной технологии и систем ее контроля требует проведения прецизионных экспериментальных исследований деталей процессов кристаллизации и таяния льда в пищевом сырье.

Достоверность полученных научных результатов, научного положения и рекомендаций обеспечены подробным сравнением расчетных величин и экспериментальных данных различных авторов, которые демонстрируют отклонения не выше погрешностей опытных данных. Достоверность полученных данных по ТФС подтверждена не только явным сравнением расчетных и экспериментальных значений самих ТФС, но и неявно, через их использование для расчета температурных полей, тепловых потоков, длительности процессов холодильной обработки и размораживания.

Практическая ценность результатов работы состоит в том, что получен обширный обобщающий материал для решения задач анализа протекающих биохимических реакций и формирования качественных изменений в различных видах рыб и рыбопродуктов, последующей оптимизации процессов холодильной технологии, проектирования и эксплуатации техники холодильной обработки и размораживания рыб и рыбного сырья.

Апробация работы: основные результаты исследований докладывались и обсуждались на 60-й учебно-методической и научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и студентов ОГАХ "Теория и практика вузовской науки" (г. Одесса, 1995 г.), на IV международной конференции по экологии ОГАХ "Экология, продукты питания, здоровье" (г. Одесса, 1995 г.), на международной научно-технической конференции "Холод и пищевые производства" (г. Санкт-Петербург, 1996 г.), на V научно-методической конференции ОГАХ "Людина та навколишнє середовище-проблеми безперервної екологічної освіти в вузах" (г. Одесса, 1996 г.), на международной конференции "Refrigeration and Aquaculture" Международного института холода (г. Париж, 1996 г.).

Публикации: по теме диссертации опубликовано две статьи в трудах международной конференции "Refrigeration and Aquaculture", проведенной Международным Институтом Холода (г. Париж, 1996 г.), три доклада в трудах Одесской Государственной Академии Холода, один доклад в трудах международной конференции Санкт-Петербургской Государственной Академии Холода и Пищевых Технологий.

Структура и объем диссертации: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и содержит 95 стр. текста, 56 рисунков, 13 таблиц и 3 приложения на 26 страницах. Список литературы состоит из 161 источника, из них 81 иностранное.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен анализ современного состояния теории и практики в реализации процессов охлаждения, замораживания и размораживания рыбы, в частности, данных по ТФС рыб и рыбопродуктов, способов и режимов холодильной обработки и размораживания, их математического моделирования. На основе проведенного анализа формулируются цели и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена восстановлению значений ТФС при охлаждении и замораживании рыб в широком диапазоне температур ($-40 \div 30$ °С) по имеющимся ограниченными экспериментальным литературным данным различных исследователей. В анализе использовались данные для двадцати шести видов рыб (треска, лосось, пикша, морской окунь, тунец, скумбрия, лещ, шпрота, ставрида, килька, форель, судак, сом, сельдь и др.). Поскольку в литературе отсутствуют данные о свойствах жировой компоненты рыб, они рассматривались как объекты четырехкомпонентного состава - сухая компонента, воздух, вода, лед. При заданных зависимостях от температуры ТФС воды (включая переохлажденное состояние), льда и воздуха получено, что для сухой компоненты всех видов рыб и рыбопродуктов имеют место зависимости:

- для удельной теплоемкости: $C_C(T) = 450 + 9.9t$,
- для плотности: $\rho_C(T) = 1330 - 0.255T$,
- для теплопроводности: $\lambda_C(T) = 0.131 + 2 \cdot 10^{-3}t$.

Суммарные ТФС рассчитывались по аддитивным соотношениям вкладов соответствующих свойств компонент (массовым или по удельным объемам), апробированным для мясного сырья, овощей, молочных продуктов:

$$C(T) = C_C W_C + C_B W_B (1 - \omega) + C_L W_B \omega,$$

$$\frac{1}{\rho(T)} = \frac{W_C}{\rho_C} + \frac{W_B (1 - \omega)}{\rho_B} + \frac{W_B \omega}{\rho_L} + \frac{\Delta W_G}{\rho_G},$$

$$\frac{\lambda(T)}{\rho(T)} = \lambda_C \frac{W_C}{\rho_C} + \lambda_B \frac{W_B (1 - \omega)}{\rho_B} + \lambda_L \frac{W_B \omega}{\rho_L} + \lambda_G \frac{\Delta W_G}{\rho_G}.$$

Эффективная удельная теплоемкость рассчитывалась (соответственно источнику члену уравнения теплопроводности) по формуле:

$$C_{эфф}(T) = C(T) - W_B L(T) \frac{d\omega(T)}{dT},$$

а для равновесной доли вымороженной воды $\omega(T)$ и ее производной по температуре наиболее удачной оказалась аппроксимация Риделя:

$$\omega(T) = \frac{\alpha}{A W_B}, \quad \text{где} \quad A = 1 + (\alpha - 1) \frac{\ln(T_{кр} + \gamma - T_3)}{\ln(T_{кр} + \gamma - T)}.$$

Для рыб и рыбопродуктов получено, что $T_3 = 77$ К, $\alpha = 1.10$, $\gamma = 1.12$ в различных процессах замораживания. На основании полученных соотношений рассчитывалась также удельная энтальпия, объемная эффективная теплоемкость, теплота фазового перехода вода-лед, необходимые в дальнейшем анализе процессов холодильной обработки рыб.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений показало, что отклонения достигают по теплоемкости 6...7%, по плотности не более 4%, по теплопроводности 8...10%, но в области температур начала кристаллизации воды возрастают до 20%. Такое описание принято как удовлетворительное, поскольку экспериментальные данные различных авторов различаются с аналогичными отклонениями. Типичное согласование экспериментальных и расчетных данных по ТФС представлено на рис. 1, 2.

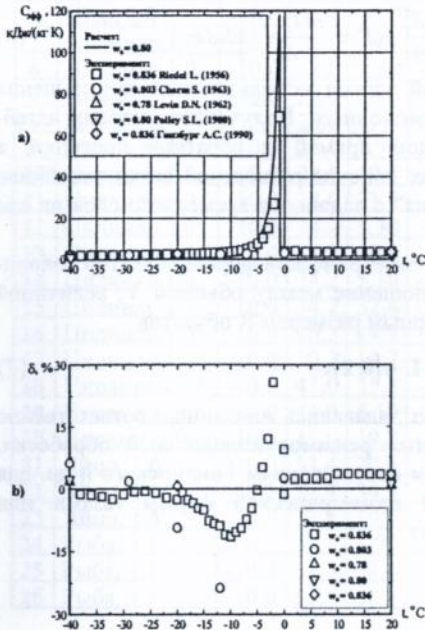


Рис. 1 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по теплоемкости при замораживании пищи (а - сравнение абсолютных величин, б - относительные отклонения)

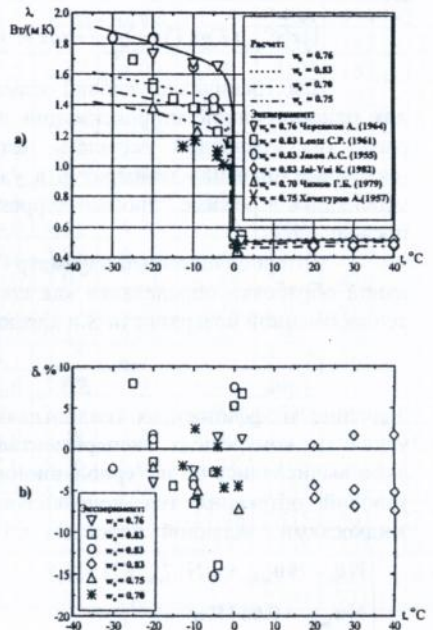


Рис. 2 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по теплопроводности при замораживании трески (а - сравнение абсолютных величин, б - относительные отклонения)

Третья глава посвящена математическому моделированию процессов охлаждения и замораживания рыб и рыбного сырья с целью описания длительности процессов, изменений температурных полей и тепловых потоков во времени, достигаемых среднезатальпийных температур. Математическая модель представляет собой нелинейную одномерную краевую задачу теплопроводности с интерполяционным параметром Γ , характеризующего форму объектов холодильной обработки как тел неправильной геометрической формы:

$$\begin{cases} C_{пп}(T)\rho(T)\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{x^\Gamma} \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T)x^\Gamma \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right]; \\ T(x, 0) = f(x), \quad x \in [0, R], \quad \tau > 0; \\ -\lambda(T(R, \tau))\frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} + \alpha(\tau)[T_c(\tau) - T(R, \tau)] = 0; \\ \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Одномерность краевой задачи обусловлена отсутствием достаточно полных данных по локальным коэффициентам теплоотдачи, фактическая усредненность $\alpha(\tau)$ по угловым координатам поверхности объектов холодильной обработки. Зависимости ТФС от температуры соответствуют результатам второй главы.

Конечно-разностная аппроксимация краевой задачи (5) системой алгебраических уравнений проведено путем усреднения значений ТФС в окрестности ε каждого узла интегрирования (общим числом до 80...100) в рамках соотношения

$$\iint_{\varepsilon} x^{\Gamma} C_{\text{эфф}}(T) \rho(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} dx d\tau = \iint_{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) x^{\Gamma} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] dx d\tau. \quad (6)$$

Для граничных условий краевой задачи использовались соотношения для односторонней аппроксимации производных. Полученная система алгебраических уравнений решалась методом прямой и обратной прогонки, а численные значения температур в узлах конечно-разностной сетки устойчиво уточнялись в режиме "прогноз-коррекция" с заданном временного слоя на два последующих.

Интерполяционный параметр Γ геометрической формы объектов холодильной обработки определялся как соотношение между объемом V , величиной теплообменной поверхности S и характерным размером R объектов

$$\Gamma = \frac{1}{\Phi} - 1, \quad \Phi = \frac{V}{RS}, \quad \Gamma \in [0, 2]. \quad (7)$$

Значение коэффициентов теплоотдачи α задавались численно, соответственно условиям конкретных экспериментальных режимов холодильной обработки, либо вычислялись по интерполяционным соотношениям Гнилинского и др. для условий обтекания тел неправильной геометрической формы газами или жидкостями с заданной скоростью потока

$$\begin{cases} Nu = Nu_{\min} + \sqrt{Nu_{\text{lam}}^2 + Nu_{\text{turb}}^2}; \\ Nu_{\text{lam}} = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}; \\ Nu_{\text{turb}} = 0.037 Re^{0.8} \frac{Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)}; \\ Nu_{\min} = 0.3...2. \end{cases} \quad (8)$$

Апробация математической модели и реализующего ее алгоритма проводилась, прежде всего, при описании длительности процессов замораживания (достижения в опытах температуры "центра" объекта, равной минус 10 °С) объектов из модельного, строго заданного состава, вещества - тилозы. Результаты экспериментов Cleland et. al. и наших расчетов представлены в табл. 1. Представленные здесь значения среднеэнтальпийной температуры в конце процесса указывают насколько некорректно использовать температуру центра в качестве конечной цели процесса. Сравнение расчетных и экспериментальных профилей температурных полей, тепловых потоков, их изменение во времени проведено для девяти видов рыб. Расхождение составляет несколько градусов по температурам, 10...15% по тепловым потокам с поверхности. Учитывая известную неопределенность положения термодатчиков (как и расчетных координат) в объектах неправильной геометрической формы полученное согласование расчетных и

Таблица 1 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по времени замораживания различных геометрических форм из модельного вещества - тилозы

N ^o	Форма и значение Г	t _ц	α	t _n ^{np}	t _c	τ _{эксп}	τ _{расч}	δ	q _n	q _к	t _i ^{ср}
1	Шар, 2.0	-10.0	51.4	20.5	-21.1	3.03	3.45	13.86	2051	207	-16.1
2	Шар, 2.0	-10.0	51.4	36.7	-22.5	3.55	3.53	-0.42	2931	227	-17.2
3	Шар, 2.0	-10.0	51.4	4.00	-37.9	1.83	1.87	2.57	2056	392	-27.0
4	Шар, 2.0	-10.0	51.4	30.7	-38.1	1.99	2.22	11.4	3401	394	-27.3
5	Цилиндр, 1.0	-10.0	28.0	18.1	-19.7	9.83	9.54	-2.95	1030	143	-12.6
6	Цилиндр, 1.0	-10.0	28.0	2.80	-23.6	6.77	7.00	3.4	717	187	-14.0
7	Цилиндр, 1.0	-10.0	28.0	33.6	-25.0	7.88	8.36	6.1	1601	203	-14.6
8	Цилиндр, 1.0	-10.0	28.0	19.4	-27.0	7.34	7.12	3.0	1265	224	-15.4
9	Цилиндр, 1.0	-10.0	28.0	2.70	-30.6	5.82	5.66	2.75	905	279	-16.1
10	Цилиндр, 1.0	-10.0	28.0	19.4	-33.9	5.45	6.04	-10.83	1452	318	-17.6
11	Цилиндр, 1.0	-10.0	28.0	23.9	-38.5	5.18	5.56	-7.34	1702	373	-19.2
12	Цилиндр, 1.0	-10.0	34.2	3.30	-19.8	4.51	4.78	-5.99	769	225	-11.3
13	Цилиндр, 1.0	-10.0	34.2	19.3	-27.2	3.78	4.10	-8.47	1553	360	-12.9
14	Цилиндр, 1.0	-10.0	34.2	3.10	-30.6	3.01	3.21	-6.64	1122	420	-14.9
15	Цилиндр, 1.0	-10.0	34.2	32.4	-39.0	2.71	2.80	-3.32	2388	694	-17.8
16	Цилиндр, 1.0	-10.0	20.3	14.9	-22.2	6.27	6.85	-9.25	742	200	-11.2
17	Цилиндр, 1.0	-10.0	20.3	19.7	-34.1	4.12	4.05	1.7	1077	365	-12.6
18	Пирамида, 0.5	-10.0	41.0	35.8	-25.6	3.62	3.92	8.43	2463	412	-12.8
19	Пирамида, 0.5	-10.0	41.0	5.10	-29.2	2.70	2.72	0.93	1370	492	-13.5
20	Пирамида, 0.5	-10.0	41.0	19.8	-38.0	2.48	2.47	-0.40	2314	686	-16.0
21	Яйцо, 1.6	-10.0	51.4	20.6	-22.6	5.76	5.67	-1.48	2105	147	-17.3
22	Яйцо, 1.6	-10.0	51.4	34.9	-29.1	4.55	4.90	7.7	3133	206	-21.8
23	Яйцо, 1.6	-10.0	51.4	19.6	-38.6	4.11	3.51	-14.48	2835	301	-28.2
24	Рыба, 1.1	-10.0	51.4	5.90	-21.9	4.13	4.15	0.48	1368	238	-15.0
25	Рыба, 1.1	-10.0	51.4	34.4	-29.1	3.65	3.90	6.99	3147	350	-18.4
26	Рыба, 1.1	-10.0	51.4	16.3	-38.5	2.81	2.72	-3.2	2704	503	-23.0

экспериментальных величин можно считать удовлетворительным. В свою очередь, полученные результаты свидетельствуют об апробации данных, полученных нами по ТФС рыб и рыбопродуктов.

Типичные примеры согласования расчетных и экспериментальных величин иллюстрируются на рис. 3 - 6.

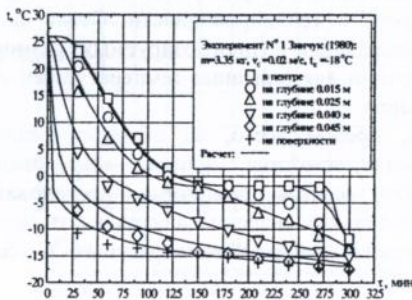


Рис. 3 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по температурным полям во времени для процесса замораживания тунца в рассоле

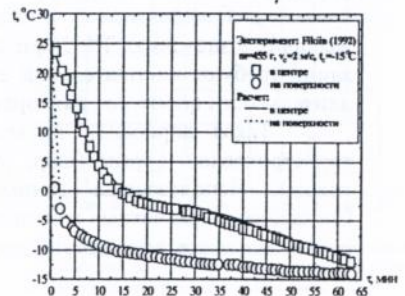


Рис. 4 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по температурным полям во времени для процесса замораживания форели в рассоле

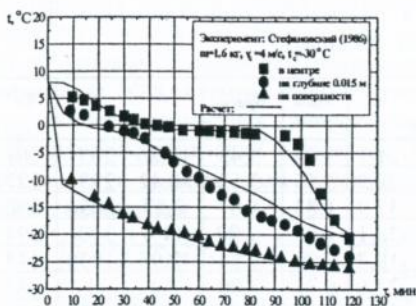


Рис. 5 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по температурным полям во времени для процесса замораживания трески в воздухе

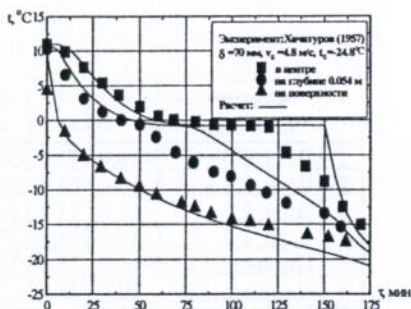


Рис. 6 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по температурным полям во времени для процесса замораживания сома в воздухе

Четвертая глава посвящена исследованию процесса размораживания рыб, на протекании которого сказываются необратимые эффекты при замораживании в связях воды с “сухой” частью продукта. Интегрально они сказываются на долях вымороженной воды, существенно отличных от значений, формирующихся при замораживании (гистерезис). В итоге существенно другими становятся и ТФС водосодержащих продуктов, начиная с эффективной теплоемкости, которая в отличие от (3), определяется соотношением

$$C_{эфф}(T) = C(T) + W_B L(T) \frac{\partial \omega(T)}{\partial T}. \quad (9)$$

Равновесная доля вымороженной воды для рыб при их размораживании экспериментально не исследована. Поэтому в основу анализа положены экспериментальные данные по $\omega(T)$ для говядины, полученные Роговым И.А., Кулагиным В.Н. методом ЯМР в режиме нагрева образца, замороженного в жидком азоте. Показано, что выбором значений параметров α , γ формулы Риде-ля (4) такие данные удовлетворительно описываются и составляют величины:

$\alpha=1.55$, $\gamma=1.13$ - для говядины,

$\alpha=1.65$, $\gamma=1.48$ - для тилозы,

$\alpha=1.52$, $\gamma=1.45$ - для рыб.

На рис. 7, 8 представлены типичные кривые для доли вымороженной воды в процессах замораживания и размораживания, а на рис. 9 - 12 соответствующие кривые для эффективной теплоемкости и теплопроводности. Столь сильные различия в значениях ТФС при замораживании и (прогнозируемых) размораживании требуют их тщательной апробации для описания температурных полей, длительности процессов размораживания.

Такая апробация проведена, прежде всего, на объектах различной геометрической формы (шар, пирамида, пластина, цилиндр, яйцо, рыбы) из тилозы. Использованы данные 130 опытов различных исследователей. Согласование расчетных и экспериментальных значений длительности процесса размораживания, как времени достижения “центром” температуры 0°C , состав-

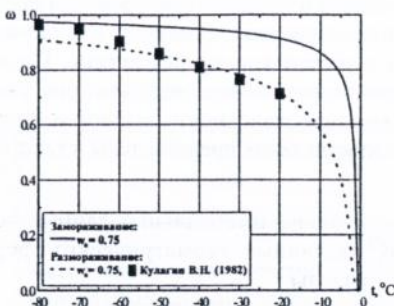


Рис. 7 - Гистерезисная зависимость доли вымороженной воды от температуры в процессе замораживания и обратном процессе размораживания говядины

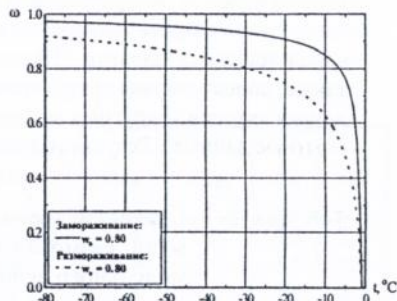


Рис. 8 - Гистерезисная зависимость доли вымороженной воды от температуры в процессе замораживания и обратном процессе размораживания рыбы

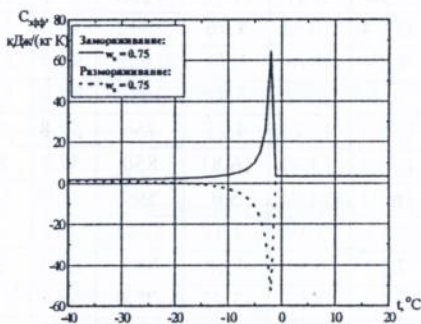


Рис. 9 - Гистерезисная зависимость эффективной теплоемкости от температуры в процессе замораживания и обратном процессе размораживания говядины

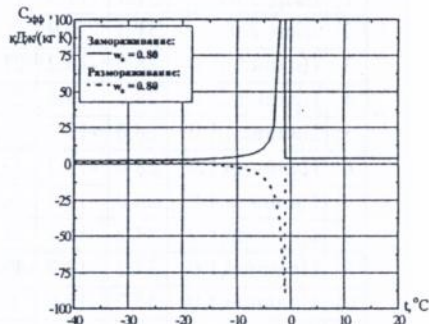


Рис. 10 - Гистерезисная зависимость эффективной теплоемкости от температуры в процессе замораживания и обратном процессе размораживания рыбы

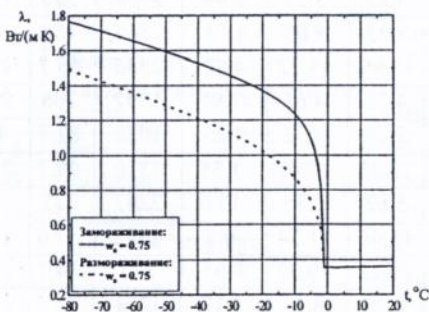


Рис. 11 - Гистерезисная зависимость теплопроводности от температуры в процессе замораживания и обратном процессе размораживания говядины

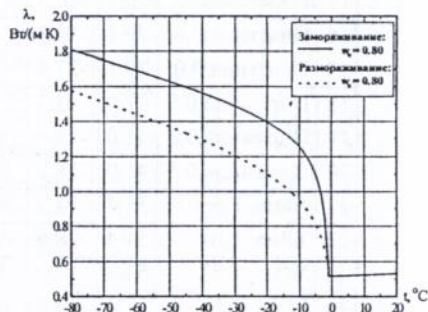


Рис. 12 - Гистерезисная зависимость теплопроводности от температуры в процессе замораживания и обратном процессе размораживания рыбы

ляет не более 5...7%, результаты показывают о столь же некорректном использовании температуры "центра". Аналогичные расчеты проведены для размораживания говяжьих пластин (18 опытов) и дали такие же результаты. Проведено также сопоставление результатов наших расчетов с результатами расчетов других авторов и другими методами (включая зависимости, аппроксимирующие опытные данные). Результаты такого сопоставления представлены в табл. 2 - 3.

Таблица 2 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по времени размораживания различных геометрических форм из модельного вещества - тилозы

N°	Форма и значение Γ	α	t_n^{np}	t_c	$\tau_{\text{эксп}}$	$\tau_{\text{расч}}$	δ	q_n	q_k	t_i^{cp}
1	Шар, 2.0	51.4	-11.9	12.8	5.94	6.01	-1.18	1238	45.2	10.3
2	Шар, 2.0	51.4	-20.9	5.6	11.14	10.61	4.76	1332	16.5	4.64
3	Цилиндр, 1.0	28.0	-15.2	21.1	9.95	9.78	1.71	1002	95.5	12.8
4	Цилиндр, 1.0	28.0	-16.6	20.8	10.6	9.92	6.42	1032	94.0	12.6
5	Цилиндр, 1.0	28.0	-13.7	13.7	13.79	13.21	4.21	756	57.8	8.5
6	Цилиндр, 1.0	28.0	-17.2	13.6	16.12	13.41	16.81	850	57.3	8.4
7	Цилиндр, 1.0	28.0	-16.1	5.6	26.23	24.84	5.0	599	21.9	3.52
8	Цилиндр, 1.0	34.2	-15.7	21.1	5.13	5.19	-1.17	1242	142	12.2
9	Цилиндр, 1.0	34.2	-12.7	13.6	7.19	6.94	3.48	887	84.7	8.1
10	Цилиндр, 1.0	34.2	-12.6	8.5	9.35	9.67	-3.42	712	50.0	5.17
11	Цилиндр, 1.0	34.2	-32.5	5.6	15.17	15.47	-1.98	1288	34.0	3.38
12	Цилиндр, 1.0	20.3	-28.1	5.3	18.83	17.98	4.51	670	30.8	2.73
13	Пластина, 0.0	281	-22.7	14.6	6.44	5.96	7.45	9730	194	6.3
14	Пластина, 0.0	281	-11.5	5.6	11.93	12.01	-0.67	4434	75.1	2.3
15	Пластина, 0.0	79.1	-10.3	41.3	3.45	3.21	6.96	3986	550	15.8
16	Пластина, 0.0	79.1	-23.5	13.2	8.43	8.05	4.51	2842	158	5.1
17	Пластина, 0.0	79.1	-27.4	5.4	15.99	15.22	4.82	2540	65.7	1.95
18	Пирамида, 0.5	41.0	-13.5	21.0	4.52	4.61	-1.99	1397	206	9.50
19	Пирамида, 0.5	41.0	-15.6	9.8	7.65	7.32	4.25	1028	87.7	4.5
20	Пирамида, 0.5	41.0	-28.2	5.6	12.28	12.47	-1.55	1370	49.7	2.48
21	Яйцо, 1.6	51.4	-14.9	30.1	5.62	6.35	-13.0	2247	112	22.5
22	Яйцо, 1.6	51.4	-28.6	12.8	11.46	11.54	-0.7	2072	37.6	10.0
23	Яйцо, 1.6	51.4	-12.0	5.7	21.22	19.32	8.95	883	14.7	4.54
24	Рыба, 1.1	51.4	-13.0	14.7	8.29	8.11	2.17	1391	92.4	8.41
25	Рыба, 1.1	51.4	-13.7	10.8	10.48	10.16	3.1	1231	65.8	6.3
26	Рыба, 1.1	51.4	-28.4	5.6	18.76	16.56	12.1	1711	33.2	3.23

Таблица 3 - Суммарные отклонения между расчетными и экспериментальными данными по времени размораживания пластин, цилиндров, шаров из модельного вещества - тилозы полученные различными методами и авторами

№	Источник	Форма	δ_{min}	δ_{max}	$\delta_{об}$	$\delta_{ст}$
1	Автор (используя экспериментальные данные Cleland et.al.)	Все 3 формы	-4.8	7.6	-0.3	2.4
		Пластина	-4.6	2.7	-1.1	2.1
		Цилиндр	-5.5	5.2	0.0	2.4
		Шар	-4.8	7.6	0.3	2.7
2	Cleland и др. (метод конечных разностей)	Все 3 формы	-9.5	9.1	-1.3	4.0
		Пластина	-6.3	6.8	-0.8	3.5
		Цилиндр	-6.8	3.6	-2.2	2.4
		Шар	-9.5	9.1	-0.9	5.5
3	Cleland и др. (метод конечных элементов)	Все 3 формы	-9.2	11.4	-0.9	4.4
		Пластина	-7.0	6.5	-2.0	3.6
		Цилиндр	-6.0	4.6	-1.7	2.5
		Шар	-9.2	11.4	1.2	5.8
4	Cleland и др. (с использованием формулы A.Calvelo)	Все 3 формы	-10.2	15.2	0.1	5.7
		Пластина	-7.2	15.2	0.4	6.0
		Цилиндр	-7.7	5.2	-1.6	3.2
		Шар	-10.2	14.6	1.5	6.9
5	Cleland и др. (с использованием формулы D.J. Cleland et. al.)	Все 3 формы	-9.2	12.0	-0.2	4.9
		Пластина	-7.0	10.2	-0.2	4.5
		Цилиндр	-9.2	5.9	-1.8	3.3
		Шар	-9.0	12.0	1.3	6.0
6	Cleland и др. (с использованием формулы K.T. Pham)	Все 3 формы	-12.6	14.3	0.0	5.4
		Пластина	-7.0	14.3	1.7	6.0
		Цилиндр	-7.1	4.4	-1.1	3.1
		Шар	-12.6	10.7	-0.5	6.2
7	Cleland и др. (с использованием формулы K.T. Pham)	Все 3 формы	-10.2	10.3	0.3	5.6
		Пластина	-8.8	11.1	0.1	5.2
		Цилиндр	-8.8	5.9	-1.3	3.9
		Шар	-10.2	14.8	2.1	6.9
8	Plank	Все 3 формы	-28.0	50.5	6.0	21.4
9	Goodman	Все 3 формы	-15.3	53.7	13.3	17.6
10	Nagaoka и др.	Все 3 формы	45.4	122.6	79.1	15.2
11	Mellor and Seppings	Все 3 формы	-36.4	30.7	-4.0	14.4
12	Pham	Все 3 формы	0.6	35.0	14.7	7.2
13	Hung and Thompson	Все 3 формы	14.7	134.2	92.2	26.6
14	Calvelo	Все 3 формы	-12.1	17.1	0.0	6.0
15	Creed and James	Все 3 формы	-20.0	21.9	0.2	9.1

Температурные поля блоков рыбы при размораживании рассчитывались по методике третьей главы, но со значениями ТФС, характерных для размораживания. Сопоставление с экспериментальными данными проводилось для трески и кильки, для которых имелись экспериментальные данные. Расхождение расчетных и экспериментальных значений температур такое же, как и в случае замораживания. Это подтверждает “работоспособность” математической модели, а также подтверждает правомочность сделанного прогноза значений ТФС при размораживании. Типичное согласование расчетных и экспериментальных значений температур в размораживаемом рыбном блоке иллюстрируется на рис. 13, 14.

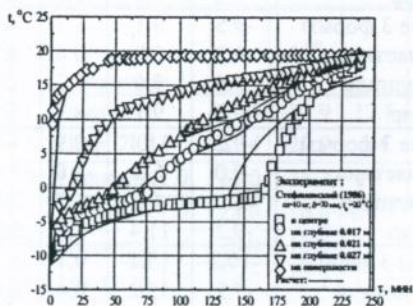


Рис. 13 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по температурным полям во времени для процесса размораживания блока кильки в условиях свободного движения воды

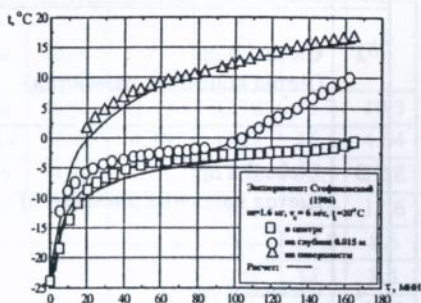


Рис. 14 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по температурным полям во времени для процесса размораживания трески в воздухе

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Представленные научные результаты во второй, третьей и четвертой главах диссертации позволяют сделать вывод о том, что поставленные цели и задачи работы выполнены, данная работа в этом смысле является законченной научно-исследовательской работой. С другой стороны, обобщение полученных научных результатов позволяет сделать следующие выводы, которые явно не отражены в конце каждой из глав диссертации:

1. Аддитивные по массовым долям и по удельным объемам компонент рыб и рыбных продуктов соотношения для ТФС обеспечивают приемлемое, с погрешностью не выше погрешности существующих экспериментальных данных, описание зависимостей ТФС, несмотря на включение жировой компоненты в общую “сухую” часть.
2. Газовая (воздушная) компонента рыб и рыбопродуктов существенно влияет на значения плотности и особенно теплопроводности в отрицательной области температур.
3. Гистерезисный характер формирования значений доли вымороженной воды для процессов замораживания и размораживания рыбного сырья, говядины, тилозы описан корреляционной зависимостью достаточно приемлемо в смысле согласования расчетных и экспериментальных значений ТФС, а затем и

данных по температурным полям, тепловым потокам, продолжительности процессов. Однако, в количественном отношении по доли вымороженной воды необходимы экспериментальные исследования, которые позволят уточнить специфику необратимых изменений в продуктах при их замораживании с последующим размораживанием.

4. Температурные исследования тел неправильной геометрической формы в экспериментах различных авторов содержат существенную некорректность в фиксации положения термодатчиков (где в центре объекта?, на глубине от поверхности, но с какой стороны? и т.п.). Несмотря на это, в рамках столь же некорректной постановки, одномерная краевая задача теплопроводности с интерполяционным параметром формы позволяет достичь описания экспериментальных температурных полей объектов неправильной геометрической формы с погрешностью на уровне отклонений в $1...2^{\circ}\text{C}$ как для быстротекущих процессов холодильной обработки (200...300 с), так и для медленнопротекающих (6...7 часов и более). Учитывая отсутствие в литературе каких-либо обобщенных зависимостей для значений локальных коэффициентов теплоотдачи при обтекании газами или жидкостями тел различной геометрической формы, представляется, что развитие разработанной здесь методики в направлении двух- и трехмерных задач теплопроводности не обеспечит существенного уточнения результатов и, по-видимому, не нужно.
5. Использование температуры "псевдоцентра" тел неправильной геометрической формы в качестве характерной конечной температуры в процессах холодильной обработки и размораживания неправомерно даже в полумпирических соотношениях ученых новозеландской, австралийской, аргентинской научных школ для продолжительности процессов. Полученные нами результаты показывают, что при одинаковой для различных тел конечной температуре центра их среднезентальпийная температура существенно различна (до 10°C), т.е. от таких тел отводится (или подводится) существенно различное количество теплоты. Поэтому в качестве конечной температуры следует использовать значения среднезентальпийной температуры, а ее измерение (в системах контроля) проводить в характерных для нее точках объектов холодильной обработки или размораживания.
6. В ситуации, когда нами достигнуто полномасштабное описание процессов холодильной обработки и размораживания, возникает впечатление, что на этой основе можно приступить к решению задач поиска оптимальных режимов холодильной обработки или размораживания при использовании различных охлаждающих или нагревающих сред (газовых, жидких, твердых поверхностей). При этом оптимизация возможна по критериям энергетических затрат, в рамках технико-экономического или термо-экономического (эксергетического) критериев, в условиях "плавающих" цен на рыбу и рыбопродукты. Тем не менее ясно, что изменения качества, формирующиеся протекающими биохимическими процессами в рыбном сырье при его холодильной обработке, хранении, размораживании, являются гораздо более весомым фактором в формировании оптимизационного функционала, чем энергетические или другие. В этом плане достигнутые нами описания температурных полей при различных способах холодильной обработки и размораживания следует рассматривать как создание основы для построения

8. математических моделей протекающих биохимических процессов, основой для проведения дальнейших актуальных исследований.
9. Разработанные нами алгоритмы расчетов, с одной стороны, благодаря интерполяционному параметру формы объектов, обеспечивают получение температурных полей, тепловых потоков, среднеэнтальпийных температур в режиме реального времени, с другой стороны, реализуют расчеты на современных компьютерах достаточно быстро. Поэтому их можно рекомендовать не только для проведения технологических расчетов, использования в решении задач проектирования технических средств холодильной обработки и размораживания, но и в системах контроля работы технических средств и технологических процессов.
10. Конкретные виды рыб и рыбопродуктов, как и другое пищевое сырье, включая растительное, выступают в качестве неких абстрактных объектов, поскольку существенно отличаются влажосодержанием и другими характеристиками в зависимости от места лова, особенностей климата и т.п. В связи с этим не представляется возможным стандартизировать ТФС рыб по их конкретному названию. Поэтому целесообразнее стандартизировать алгоритм расчета или таблицы свойств в широком (возможном) диапазоне влажосодержаний.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Graizi J.A., Chumak I.G., Onistchenko V.P., Terziev G.S. Mathematical Model of Various Freezing Processes of Fish and Fish-Products // Proc. Of the Conf. Of IIR, Commission C2, Bordeaux, France, March 1996. - Paris, IIR, 1996. - Vol. 2. - p. 379-386.
2. Graizi J.A., Onistchenko V.P., Chepurnenko V.P. Thermophysical Properties of Different Kinds of Fish // Proc. Of the Conf. Of IIR, Commission C2, Bordeaux, France, March 1996. - Paris, IIR, 1996. - Vol. 2. - p. 283-290.
3. Грайзи Ж.А., Кутыркин О.Ф., Онищенко В.П. Теплофизические свойства рыб и рыбного сырья.- В кн.: Тр. 60-й учебно-методической и научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и студентов "Теория и практика вузовской науки". (г. Одесса, 1995 г.): Тез. докл.- Одесса: ОГАХ.- 1995.-с. 14.
4. Онищенко В.П., Желиба Ю.А., Головский С.Е., Грайзи Ж.А. Научно-методические аспекты задач замораживания биологических объектов растительного и животного происхождения.- В кн.: IV международная конференция по экологии "Экология, продукты питания, здоровье". (г. Одесса, 1995 г.): Тез. докл.- Одесса: ОГАХ.- 1995.- с. 52.
5. Грайзи Ж.А., Онищенко В.П. Математическое моделирование процессов охлаждения и замораживания рыбы.- В кн.: Международная научно-техническая конференция "Холод и пищевые производства". (г. Санкт-Петербург, 1996 г.): Тез. докл.- Санкт-Петербург: СПАХиПТ.- 1996.- с. 129.
6. Грайзи Ж.А. Экологические аспекты холодильной технологии рыбы и рыбопродуктов.- В кн.: V науково-методична конференція "Людина та навколишнє середовище-проблеми безперервної екологічної освіти в вузах" (г. Одесса, 1996 г.): Зб. наук. праць - Одесса: ОГАХ.- 1996.- с. 129.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

№ ²	Условные обозначения	Наименование величин	Единица измерений		
1	C	удельная теплоемкость	кДж/ (кг К)		
2	λ	теплопроводность	Вт/ (м К)		
3	a	температуропроводность	м ² /с		
4	ρ	плотность	кг/м ³		
5	ω	доля вымороженной воды	-		
6	i	удельная энтальпия	Дж/кг		
7	L	скрытая теплота фазового перехода	Дж/кг		
8	W	относительная доля вещества в продукте	-		
9	T (t)	температура	К (°C)		
10	Γ	интерполяционный параметр	-		
11	Φ	коэффициент формы (гомохронности)	-		
12	R	характерный размер продукта	м		
13	S	площадь	м ²		
14	V	объем	м ³		
15	m	масса	кг		
16	v	скорость	м/с		
17	q	удельный тепловой поток	Вт/м ²		
18	α	коэффициент теплоотдачи	Вт/ (м ² К)		
19	τ	время	ч (мин., с)		
20	x	текущая координата	-		
21	Nu	число Нуссельта	-		
22	Re	число Рейнольдса	-		
23	Pr	число Прандтля	-		
27	δ	погрешность, (толщина продукта)	%, (м)		
Подстрочные индексы					
1	в	вода	13	н	начальная
2	л	лед	14	к	конечная
3	г	газ	15	с	среда
4	ж	жир	16	ср	средний
5	с	сухие вещества	17	п	поверхность
6	кр	криоскопическая разность	18	ц	центр
7	эфф	эффективная	19	min	минимальный
8	i	энтальпийная	20	max	максимальный
9	э	эвтектика	21	lam	ламинарный
10	пр	продукт	22	conv	конвективный
11	эксп.	Эксперимент	23	об	общий
12	расч.	Расчет	24	ст	стандартный

АНОТАЦІЯ

ГРАЙЗИ ЖАМІЛЬ АФІФ. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.14 "Збереження та холодильна технологія харчових продуктів". Одеська державна академія холоду. Одеса, 1997 р.

- У дисертації наведені узагальнені співвідношення для розрахунку теплофізичних властивостей (теплоємність, густина, теплопровідність, ентальпія) для двадцяти шести видів риб (рибопродуктів), детально подані таблиці значень цих величин у діапазоні температур від 233 до 303 К при значеннях вологовмісту риб від 0.60 до 0.85;
- розроблені математична модель процесів заморожування риб і рибопродуктів, як нелінійна інтерполяційна одномірна гранична задача та реалізуючий її алгоритм розрахунків по тривалості процесів, змінам температурних полів та теплових потоків у часі, середньоентальпійних температур. Подано результати апробації математичної моделі шляхом співставлення розрахункових та експериментальних даних як для заморожування різних видів риб, так і тіл різної геометричної форми з модельної речовини - тілози;
- зпрогнозовані значення теплофізичних властивостей риб та рибопродуктів при їх розморожуванні, що враховують незворотні зміни в продуктах під час заморожування;
- розроблена математична модель та приведені результати її апробації для опису процесів розморожування риб та рибопродуктів.

Захищається наукове положення, що конкретизує вплив гістерезису по долі вимороженої води під час заморожування і розморожування харчової сировини на енергетику цих процесів та якість продуктів.

Ключові слова: риба та рибопродукти, теплофізичні властивості, охолодження, заморожування, розморожування, математичне моделювання.

SUMMARY

Grazi Jamil Afif. The dissertation for the scientific degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.18.14 - storage and refrigerating technology of food products. Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa, 1997.

- In the dissertation it was proposed additive correlations for calculations of thermophysical properties (heat capacity, density, heat conductivity, enthalpy) for 26 species of fishes (fish-products). Results of the work are accompanied by tables in a wide range of temperatures (233 - 303 K) and weight fractions (0.6 - 0.85);
- Mathematical modelling of fish and fish produce freezing process is based on one-dimensional non-linear interpolating boundary problem of heat conductivity. The algorithm gives the opportunity to calculate temperature profile, heat flow, mean enthalpy temperature, thickness of several frozen layers in any point of time and finite time of freezing for objects with arbitrary shapes. Results calculated are compared with a big variety of experimental data on processes of freezing for different kinds of fish and tylose objects;
- Forecasted the values of thermophysical properties of fish and fish produce on processes of thawing, which take into account irreversible changes in products during the freezing processes;
- Worked out the Mathematical model and is developed results of its approbation for description of thawing processes of fish and fish produce.

Maintained is the scientific statement concretizing the influence of hysteresis in equilibrium fraction of frozen-out water $\omega(T)$ during the freezing and thawing processes of food raw material on maintaining product quality and saving energy.

Key words: fish and fish produce, thermophysical properties, cooling, freezing, thawing, mathematical modeling.

Сдано в набор 21.03.97 г. Подписано в печать 24.03.97 г.
Бумага Business. Формат 210 x 297. Объем 1 п. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 29.

Отпечатано в Копировальном центре СП "Петрэкс"
Тел.: (0482) 22-30-28, 22-09-62, 21-93-48

AB 37.377