

Автореферат
С 49

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

СЛЫНЬКО

Надежда Александровна

**МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА
РАВНОВЕСНЫХ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЙ
ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

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

05.18.12 — Процессы, машины и агрегаты
пищевой промышленности

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса — 1991

Работа выполнена в Одесском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров морского флота и в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики

Научные руководители:

Заслуженный деятель науки УССР, доктор технических наук, профессор **И. Г. Чумак**;

доктор технических наук, профессор **В. А. Загоруйко**.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **М. А. Гришин**;

доктор технических наук, профессор **В. И. Недоступ**.

Ведущая организация: Южный научно-исследовательский институт морского флота (ЮЖНИИМФ).

Защита диссертации состоится 28 » июня 1991 г.

в 11.00 часов на заседании специализированного совета К.068.27.01 в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики по адресу: 270057, г. Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, ОИНТЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан « 24 » мая 1991 г.

секретарь
совета,
цент
делами с учетом
Р. К. НИКУЛЬШИН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При разработке эффективных технологических процессов первичной обработки и длительного хранения пищевого сырья и продуктов его переработки определяющее значение имеют данные об их равновесном влагосодержании.

Экспериментальные методы определения равновесных влагосодержаний материалов, оставаясь основным методом получения таких данных, не удовлетворяют возрастающим требованиям, вытекающим из широко развивающихся оптимизационных методов проектирования и организации соответствующих технологических процессов и, в частности, при автоматизации технологических процессов пищевых производств.

В связи с этим, в настоящее время актуальной задачей является разработка таких методов прогнозирования и аналитического описания данных о равновесном влагосодержании пищевого сырья и продуктов его переработки, которые, будучи универсальными, обеспечивали бы высокую точность и внутреннюю согласованность рассчитываемых свойств.

Цель работы заключается в разработке и исследовании эффективных методов прогнозирования и аналитического описания данных о равновесном влагосодержании материалов, а также в совершенствовании методик расчета некоторых процессов сушильной и холодильной технологий пищевых производств с использованием получаемых аналитических зависимостей $U = f(\varphi, T)$.

Задачи работы. Для достижения поставленной цели требовалось разработать и исследовать:

метод прогнозирования данных о равновесном влагосодержании пищевого сырья и продуктов его переработки, дееспособный даже при наличии ограниченных, разрозненных данных;

эффективную форму уравнения для аналитического описания данных о равновесном влагосодержании капиллярно-пористых коллоидных материалов (КПКМ) в широком интервале изменения равновесных параметров воздуха;

усовершенствованные методики расчета процессов сушильной и холодильной технологий пищевых производств с использованием получаемых аналитических зависимостей $U = f(\varphi, T)$ пищевого сырья и продуктов его переработки;

XV 996

наконец, алгоритмы и системы программ, эффективные при прогнозировании, обобщении и построении уравнений равновесного влагосодержания широкой номенклатуры пищевых продуктов.

Научная новизна работы определяется следующими основными результатами, полученными впервые:

1. Поверочными расчетами показана правомерность и эффективность использования принципа аффинного преобразования координат подобия для прогнозирования и обобщения данных о равновесном влагосодержании материалов.

2. Точность данных о равновесном влагосодержании, рассчитываемых при использовании аффинного метода преобразования координат подобия в интерполяционном варианте, соответствует точности используемых экспериментальных данных. Погрешности (расхождения) экстраполированных данных при самой неблагоприятной схеме расположения опорных данных не превышает 10%. Метод сохраняет свою дееспособность при наличии хотя бы шести произвольно расположенных экспериментальных точек о равновесном влагосодержании исследуемого материала.

3. Разработанная рациональная форма двухпараметрического уравнения $U = f(\varphi, T)$ позволяет с высокой точностью не только аппроксимировать данные о равновесном влагосодержании, но и рассчитывать коэффициенты изотермической $\left\{ C_{mT} = \left(\frac{\partial U}{\partial \varphi} \right)_T \right\}$ и изопотенциальной $\left\{ C_{m\varphi} = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_\varphi \right\}$ массемкостей в широком диапазоне изменения относительной влажности и температуры воздуха.

4. Разработанные методы прогнозирования, обобщения и аналитического описания равновесных влагосодержаний КПКМ позволили получить индивидуальные и обобщенные уравнения $W = f(\varphi, T)$ для широкой номенклатуры пищевого сырья и продуктов его переработки (зерновых и продуктов их переработки, а также для чая, бумаги, табака и др.).

5. Усовершенствованные методики расчета некоторых технологических процессов пищевых производств (охлаждение мясных полутуш и сушка толстого неподвижного слоя зерна) позволяют рассчитывать кинетику этих процессов и, следовательно, оптимизировать соответствующие технологические процессы.

Научные положения, защищаемые в работе:

1. Принцип аффинного преобразования координат подобия применим и эффективен для прогнозирования и обобщения данных о равновесном влагосодержании как гигроскопично-подобных, так и неподобных КПКМ при наличии ограниченных экспериментальных данных $U = f(\varphi, T)$.

2. Разработанная в диссертации форма двухпараметрического уравнения $U = f(\varphi, T)$ позволяет с высокой точностью не только аппроксимировать данные о равновесном влагосодержании КПКМ, но и обеспечивать наиболее теоретически вероятный характер зависимости коэффициентов массемкости в широком интервале изменения равновесных параметров воздуха.

3. Аффинный метод прогнозирования данных о равновесном влагосодержании КПКМ совместно с двухпараметрическим уравнением $W = f(\varphi, T)$ является эффективным и общим способом прогнозирования, обобщения и аналитического описания данных о равновесном влагосодержании гигроскопичных материалов.

Практическая значимость работы. Разработанный в диссертации машинный экспресс-метод прогнозирования и обобщения равновесных влагосодержаний КПКМ позволяет значительно сократить объем необходимых экспериментальных измерений равновесных влагосодержаний без существенного снижения точности соответствующих справочных данных. Так, для большого количества наименований пищевых продуктов (рыб, сушеных овощей и фруктов, чая и др.) в диссертации рассчитаны их равновесные влагосодержания в широком интервале изменения параметров воздуха, без выполнения широкомасштабных экспериментов. Эти данные могут использоваться при разработке оптимальных технологических процессов пищевых производств.

Разработанные в диссертации формы двухпараметрических уравнений $U = f(\varphi, T)$ позволяют не только автоматизировать проектирование и эксплуатацию установок по первичной обработке продуктов (охлаждению, сушке, вялению, копчению и т.д.), но и оптимизировать процессы их длительного хранения.

Аффинный метод прогнозирования равновесных влагосодержаний КПКМ совместно с двухпараметрическим уравнением $U = f(\varphi, T)$ позволяет существенно сокращать сроки и трудоемкость работ по

обеспечению теплотехнических расчетов данными о равновесном влагосодержании малоисследованных материалов.

Усовершенствованные в работе методики расчета процессов первичной обработки пищевых продуктов, в первую очередь, процессов охлаждения мяса и сушки толстого слоя зерна, позволяют рассчитывать кинетику этих процессов и разрабатывать соответствующие оптимальные технологические процессы. Приведенные в приложении к диссертации программы и таблицы рассчитанных свойств малоисследованных материалов могут использоваться в соответствующих практических расчетах – при прогнозировании гигротермических свойств материалов, а также и при оптимизационных расчетах процессов и установок пищевых производств.

Внедрение. Работа выполнена в рамках программы научных исследований ИТТФ АН УССР и Ассоциации "Сушка" по созданию банка данных о равновесном влагосодержании и гигротермическим свойствам технически важных материалов и пищевых продуктов. Разработанные методы применяются в учебном процессе при чтении соответствующих разделов курсов технического кондиционирования и холодильной технологии пищевых продуктов в ОИИМФ и ОИНТЭ. Разработанные алгоритмы программ и тепловые $\dot{I}-d$ диаграммы пищевых продуктов используются для расчета процессов их сублимационной и тепловой сушки.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на объединенном семинаре химического факультета МГУ и отделения адсорбции ИФХ АН СССР (сентябрь 1984 г.), а также на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ОИИМФ (1988-1991 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 6 статьях, опубликованных и принятых к публикации в журналах, а также депонированных в ВИНТИ, УкрНИИТИ, МИНЗаг СССР.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы и приложений. Работа изложена на 131 странице: машинописного текста, содержит 10 рисунков, 20 таблиц, библиографию из 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы с учетом развивающихся оптимизационных методов расчета технологических процессов первичной обработки и хранения пищевого сырья и продуктов его переработки.

В первой главе выполнен критический обзор и анализ известных форм уравнений для описания равновесных влагосодержаний КПКМ. Сделан вывод, что ни одно из известных уравнений непригодно для точного описания данных о равновесном влагосодержании КПКМ в широком диапазоне изменения параметров влажного воздуха.

В диссертации предложены и исследованы три формы уравнений для прецизионной аппроксимации данных о равновесном влагосодержании КПКМ (полиномиальная, экспоненциальная и показательная). Наиболее эффективной, с точки зрения простоты определения коэффициентов и характера производных, оказалась экспоненциальная форма уравнения:

$$W = \varphi \exp \left(\sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^5 a_{ij} \theta^j \varphi^i \right). \quad (1)$$

В диссертации показаны ее достоинства по сравнению с полиномиальной формой аналогичного уравнения и недостатки, обусловленные недостаточно устойчивым характером изменения коэффициентов массемкости $C_{m\varphi}$ и C_{mT} . Поэтому была предложена и апробирована показательная форма уравнения:

$$W = \tau^{m\varphi} \cdot \varphi^{n\tau} \exp \left(\sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^5 a_{ij} \theta^j \varphi^i \right), \quad (2)$$

где

$$m = f(\tau) = \beta_1 \tau^2 + \beta_0, \quad \tau = T_0/T - \text{приведенная температура.}$$

Как показано в диссертации, изотермы сорбции-десорбции, представленные в координатах $\ln \left(\frac{W}{\varphi} \right)$, φ , подготовленные для аппроксимации уравнением (1), имеют более сложную форму чем те же изотермы в координатах $\frac{\ln W}{\ln \varphi}$, φ . Поэтому изотермы влагосодержаний в этих координатах можно легче и точнее аналитически описать, чем в координатах $\ln \left(\frac{W}{\varphi} \right)$, φ . Однако, уравнение (2) является нелинейным относительно определяемых коэффици-

коэффициентов a_{ij} и поэтому его практическое применение ограничено.

В диссертации разработаны алгоритмы и системы программ для построения уравнений равновесных влагосодержаний во всех рассматриваемых формах с помощью ЭВМ. Однако, большее практическое применение нашло уравнение (1), с помощью которого составлены банки данных о равновесном влагосодержании более 150 материалов.

Во второй главе на основании обзора и критического анализа известных методов прогнозирования равновесных влагосодержаний КПКМ разработан и исследован метод прогнозирования равновесных влагосодержаний, базирующийся на принципе аффинного преобразования координат подобия. В работе исследованы два варианта согласования поверхностей равновесного влагосодержания двух КПКМ с точки зрения способа согласования поверхностей равновесных влагосодержаний сопоставляемой пары материалов. При согласовании поверхностей по изолиниям $W = idem$ связь между параметрами соответственных точек в аффинных системах координат выражается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x' &= C_{11} x + C_{12} y + C_{13} z \\ y' &= C_{21} x + C_{22} y + C_{23} z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При согласовании поверхностей равновесного влагосодержания в целом по трем координатам связь между параметрами соответственных точек выражается системой:

$$\left. \begin{aligned} x' &= C_{11} x + C_{12} y + C_{13} z + C_{14} \\ y' &= C_{21} x + C_{22} y + C_{23} z + C_{24} \\ z' &= C_{31} x + C_{32} y + C_{33} z + C_{34} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В обоих случаях накладывается условие о неравенстве нулю детерминанта системы. В первом случае определению подлежат шесть корреляционных коэффициентов, а во втором — двенадцать. Поскольку коэффициенты корреляции C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{21} , C_{22} , C_{23} и т.д. связаны нелинейно, они могут определяться только соответствующими нелинейными методами. Поэтому, учитывая невысокую точность экспериментальных данных о равновесном влагосо-

держании (3 - 8 %), система уравнений (3) является менее чувствительной к ошибкам опорных данных и гигроскопическому неподобию сопоставляемой пары материалов. Поверочными расчетами показано, что точность прогнозируемых данных в случае сопоставления гигроскопично неподобных материалов по изолиниям $W = idem$, соотношения (3), выше, чем при использовании соотношений (4). В случае гигроскопично подобных материалов точность прогнозируемых величин в обоих вариантах примерно равна.

В диссертации приведены соответствующие сопоставительные таблицы, иллюстрирующие точность и взаимосогласованность прогнозируемых данных в зависимости от метода согласования поверхностей.

В третьей главе приведены результаты всесторонней опытной проверки разработанных в диссертации методов прогнозирования и аналитического описания данных о равновесных влагосодержаниях на примере различных пищевых продуктов.

Во-первых, оценена возможная ошибка прогнозирования данных о равновесном влагосодержании по температурам при использовании данных на одной изотерме. Поверочные расчеты показали, что средние квадратические отклонения таких экстраполяций не превышают 10 %. Поэтому для семи видов рыб, для которых в справочнике Л.М.Никитиной приведены данные о равновесном влагосодержании на одной изотерме, рассчитаны коэффициенты корреляции при использовании в качестве базисного уравнения пшеницы, а для трески вакуумной сушки рассчитаны и приведены в приложении к диссертации подробные таблицы равновесных влагосодержаний и коэффициентов массоемкости.

Во-вторых, показана возможность построения единого уравнения для расчета равновесных влагосодержаний зерновых и продуктов их переработки путем аффинного преобразования координат подобия. При этом установлено, что лучшее согласование поверхностей равновесных влагосодержаний материалов наблюдается при их сопоставлении в логарифмических приведенных координатах $\ln \tau - \ln \varphi$. Связь между параметрами соответственных точек базисного и исследуемого материалов в этом случае выражается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\delta} &= \beta \tau_i^n \cdot \varphi_i^k \\ \varphi_{\delta} &= \alpha \varphi_i^{\bar{n}} \cdot \tau_i^{\bar{k}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

На базе уравнений для приведенных влагосодержаний пшеницы в форме (I), коэффициенты которых приведены в / 6 /, описаны данные о равновесных влагосодержаниях риса, овса, ржи, проса, кукурузы, подсолнечника, макаронных изделий, кофе, бобов какао и других продуктов. Точность этих обобщений при различных системах задания опорных точек показана в табл. 2, а значения коэффициентов корреляции, связывающих параметры соответственных точек сопоставляемых пар материалов в табл. I.

Таблица I

Наименование верного продукта	Вид процесса	β	μ	κ	α	$\bar{\mu}$	$\bar{\kappa}$
Рис	сорбция	1,0710	1,1347	0,0418	0,9769	0,7237	- 0,0837
	десорбция	1,1472	1,2562	0,0467	0,9733	0,8238	- 0,0970
Овес	сорбция	0,7301	0,5751	-0,1120	1,0118	1,0468	0,1800
	десорбция	0,7030	0,8417	-0,1099	1,0122	0,9596	0,1643
Рожь и ячмень	сорбция	1,0065	1,0942	0,0138	0,9980	0,9642	- 0,0214
	десорбция	1,1488	0,9972	0,0337	0,9799	1,2184	- 0,0338
Просо	сорбция	1,0618	1,1172	0,0543	0,9816	0,7084	- 0,0545
	десорбция	1,1817	1,4317	0,0840	0,9675	0,7736	- 0,1426
Кукуруза	сорбция	0,8283	0,8966	0,0219	1,0184	0,5596	0,4710
	десорбция	1,0466	1,0587	0,0159	0,9887	0,9921	0,0230
Подсолнечник	сорбция	0,9255	1,0082	0,0168	1,0020	1,0601	0,0566
	десорбция	0,7379	0,7693	-0,0735	1,0171	1,2314	0,1160
Кофе	сорбция	0,5731	1,2855	0,1421	1,0013	0,3732	0,1335
	десорбция	1,04166	1,0546	0,0060	0,9809	1,0554	- 0,0436
Макаронные изделия	сорбция	0,8838	0,7570	0,0053	1,0177	0,8914	0,0801
	десорбция	1,0147	1,2828	0,0382	0,9982	0,8844	- 0,0305
Манная крупа	сорбция	0,6847	1,1027	0,0355	0,9954	0,3084	0,2219
	десорбция	0,2994	1,7759	-0,1504	0,9559	0,1653	0,2653

В этой главе также исследованы вопросы зависимости точности экстраполяции и интерполяции равновесных влагосодержаний малоисследованных материалов в зависимости от используемого уравнения базисного материала. Установлено, что точность предлагаемого метода в интерполяционном варианте соответствует точности современного эксперимента, а при экстраполяции расхождения между расчетными данными не превышают 10 %. Расхождения между данными, рассчитываемыми по разным базисным уравнениям, находя-

Таблица 2

Продукт	Процесс	Средние квадратические относительные отклонения при использовании данных на пяти изотермах				Средние квадратические относительные отклонения при использовании данных на одной изотерме			
		МЛПК (ж)		МЛПК (в)		МЛПК (ж)		МЛПК (в)	
		$\delta W, \%$	$\delta C_{\text{пл}}, \%$	$\delta W, \%$	$\delta C_{\text{пл}}, \%$	$\delta W, \%$	$\delta C_{\text{пл}}, \%$	$\delta W, \%$	$\delta C_{\text{пл}}, \%$
Рис	сорбция	13,434	2,441	35,53	61,31	13,203	2,361	3,098	37,33
	десорбция	12,476	1,981	47,18	80,10	13,509	1,509	4,757	28,44
Овес	сорбция	29,437	5,939	30,87	48,46	29,665	4,862	15,453	34,33
	десорбция	28,490	7,355	39,96	35,85	27,394	4,155	9,879	34,13
Рожь и ячмень	сорбция	2,811	0,803	8,91	14,15	1,533	0,373	8,122	21,75
	десорбция	8,311	4,529	30,66	-	1,440	1,190	5,556	14,62
Просо	сорбция	12,276	2,385	28,84	23,38	11,945	2,383	3,385	31,28
	десорбция	12,296	2,512	59,81	83,52	12,822	1,903	4,566	33,48
Кукуруза	сорбция	4,200	2,986	34,39	26,88	3,886	2,853	8,333	40,44
	десорбция	3,433	2,377	32,98	54,01	61,506	9,247	34,219	31,16
Подсолнечник	сорбция	29,319	6,164	35,78	34,77	27,418	5,332	10,364	34,96
	десорбция	67,009	8,705	39,79	35,62	67,570	8,357	14,900	39,59
Кофе	сорбция	65,788	2,030	14,21	12,83	61,506	9,247	14,365	41,88
	десорбция	4,505	3,950	25,75	68,00	4,278	3,421	3,965	22,69
Бобы какао	сорбция	11,741	5,957	22,23	52,36	12,026	3,239	6,376	20,45
	десорбция	4,617	3,079	20,05	26,49	3,676	1,943	3,911	16,95
Манная крупа	сорбция	8,891	1,379	54,05	55,24	4,157	0,567	5,270	45,74
	десорбция	91,122	4,373	49,83	69,31	64,630	1,077	16,443	63,12
Обязательная соевая мука	сорбция	13,576	2,614	30,37	51,17	45,555	0,799	10,219	39,83
	десорбция	41,006	1,710	54,69	56,32	24,148	3,318	15,614	90,61
Бенгальская гороховая мука	сорбция								
	десорбция								

*) ПП - принцип гигроскопического подбора

ж) МЛПК - метод абфнного преобразования координат

тся в интервале тех же 10 %.

В четвертой главе диссертации рассмотрены результаты расчетов охлаждения и усушки говяжьих и свиных полутуш с помощью двух методик расчета. В основу первой методики, предложенной В.П.Онищенко и Н.И.Чумак положен принцип возможного изменения термодинамических свойств влажного воздуха в результате его взаимодействия с охлаждаемым продуктом. Эффект взаимодействия зависит от соотношения теплофизических параметров влажного воздуха и мяса в процессе их тепло-влажностного взаимодействия и выражается следующей системой дифференциальных уравнений, записанных в конечно-разностной форме:

$$\Delta G = m \frac{\Delta i - C_{в.в} \cdot \Delta t}{z(t)} \quad (6)$$

$$\Delta G = m \frac{\Delta i + \left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right) d \cdot \Delta \varphi}{\varepsilon_{\varphi}} \quad (7)$$

где $m \cdot \Delta i = \Delta Q$ - теплота отдаваемая или воспринимаемая продуктом и усваивая воздухом (закон сохранения энергии); Δt , $\Delta \varphi$ - изменение температуры и относительной влажности воздуха в процессе его взаимодействия с охлаждаемым продуктом;
 $z(t) = \left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_t = z_0 + C_n t$ - теплота испарения; $\varepsilon_{\varphi} = \left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{\varphi}$ - тепло-влажностное отношение.

Если в работах Н.И.Чумак и В.П.Онищенко соотношения (6), (7) использовались при рассмотрении макропроцессов (начало-конец охлаждения), то нами рассмотрена возможность применения их при по-шаговом расчете процессов взаимодействия системы: воздух-охлаждаемый продукт.

В основу второй методики, разработанной в диссертации, положены модельные представления о нестационарном тепло-массообмене между воздухом и продуктом. В качестве модельной системы принят нестационарный теплообмен между полутушью, в форме пластины, и охлаждающим воздухом. При этом толщина, масса, поверхность и теплофизические характеристики пластины соответствуют мясной полутуше.

Для принятой модельной системы получены следующие дифференциальные уравнения нестационарного теплообмена:

Таблица 3

Страна	Охлаждаемый продукт	Размещение охлаждающей среды	Температура охлаждающей среды, °С		Продолжительность охлаждения, ч	Усушка, %	Воздух		Теплофизические и геометрические параметры								
			от	до			скорость, м/с	температура, °С	расход, кг/с	α , Вт/м ² ·К	ε	F , м ²	δ_0 , м				
														эксп. расч.	эксп. расч.	эксп. расч.	эксп. расч.
Северная Ирландия	говядина	обученный	38	5	14-18	15,1	-	1,66	0,2	0,2	0	0	0,018	2,0	0,5	3,51	0,101
Северная Ирландия	говядина	ступенчатая	38	4	14	13,6	1,35	1,36	2,2	2,2	15	-7	0,183	1,4	0,45	3,51	0,101
Франция	говядина	общий	39	5	20	1,29	1,32	0,2	0,2	3	3	0	0,018	2,4	0,3	3,51	0,101
Франция	говядина	общий	38	5	20	1,17	1,19	3	3	0	0	0	0,276	1,6	0,3	3,51	0,101
Франция	говядина	ступенчатая	38	4	16-18	16	1,20	1,19	2,2	2,2	-10	0	0,183	2,2	0,35	3,51	0,101
Польша	говядина	интенсивный	38	4	14	14,1	1,87	1,81	1,5	1,5	-1	-1	0,138	1,75	0,6	3,51	0,101
Польша	свинина	ступенчатая	38	4	12	12,8	1,26	1,21	1,5	1,5	-5	0	0,138	3,5	0,45	2,40	0,087
ФРГ	говядина	интенсивный	39	4	20	20,2	1,5	1,57	0,5	0,5	0	0	0,045	1,6	0,40	3,51	0,101
ФРГ	свинина	интенсивный	39	4	15-18	15	1,5	1,5	0,5	0,5	0	0	0,045	2,6	0,45	2,40	0,087
Дания	говядина	интенсивный	38	4	14-18	19	1,45	1,41	-	0,7	-1	0	0,018	1,6	0,40	3,51	0,101
Дания	свинина	ступенчатая	38	4	16-18	15	1,5	1,47	1,5	1,5	-6	0	0,138	2,8	0,55	2,40	0,087
ИДР	свинина	интенсивный	39	4	14	13,4	0,95	1,00	5	5	-7,5	-	0,459	3,5	0,35	2,40	0,087
ФРГ	говядина	ступенчатая	38	4	12-14	14,4	1,00	1,04	2,2	2,2	-2	0	0,018	2,3	0,30	3,51	0,101

*) в числителе указан параметр первой стадии охлаждения продукта, а в знаменателе - во второй.

$$G_B C'_p \eta_t (T_1 - T_n) = G_M \left(c u \frac{dT}{dT} + \eta \frac{du}{dT} \right) \quad (8)$$

$$G_B \eta_d (d_1 - d_{ns}) = G_M \left(\frac{du}{dT} \right), \quad (9)$$

где $\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_n} = 1 - \exp\left(\frac{-\alpha F_G}{G_B C'_p}\right)$ - коэффициент охлаждения воздуха;

$\eta_d = \frac{d_1 - d_2}{d_1 - d_{ns}} = 1 - \exp\left(\frac{-\epsilon F_M}{G_M}\right) = 1 - (1 - \eta_t)\epsilon$ - коэффициент увлажнения воздуха.

При заданных теплофизических свойствах охлаждаемого продукта, режим охлаждения зависит от расхода воздуха (G_B), коэффициентов теплоотдачи α и экранизации поверхности массообмена ϵ . В диссертации выполнены обширные поверочные расчеты режимов охлаждения говяжьего и свиного мяса по данным различных европейских стран с использованием обеих расчетных методик (табл. 3). Из табл. 3 видно, что методом машинных экспериментов путем определения значений коэффициентов теплоотдачи α и степени экранизации ϵ , не определявшихся в натуральных экспериментах, удалось достаточно точно описать все известные нам экспериментальные данные об охлаждении говяжьих и свиных полутуш в различных европейских странах. Таким образом, впредь, определив в натуральных испытаниях значения α и ϵ , зависящие от режима охлаждения и сорта мяса, можно рассчитывать динамику охлаждения и усушки полутуш мяса и, следовательно, оптимизировать процессы охлаждения. В диссертации показано, что совпадение величин, рассчитываемых в рамках обеих методик, хорошее, если учитывать изменение относительной влажности воздуха на выходе из камеры в процессе охлаждения мяса.

В настоящей главе приведены также некоторые результаты по использованию полученной системы дифференциальных уравнений тепло-массообмена (8) и (9) для расчета процесса подогрева и сушки толстого неподвижного слоя зерна.

В В О Д Ы

I. Разработанный машинный метод прогнозирования данных о равновесном влагосодержании КПКМ, основанный на принципе аффинного преобразования координат подобия, в интерполяционном варианте соответствует точности современных методов эксперименталь-

ных измерений равновесных влагосодержаний, а при экстраполяции погрешность расчетных величин не превышает 10 %.

2. Разработанные формы двухпараметрических уравнений для описания равновесных влагосодержаний КПКМ позволяют с высокой точностью не только аппроксимировать исходные данные, но и обеспечивать наиболее теоретически вероятный характер зависимостей коэффициентов изотермической и изопотенциальной массемкостей в широком диапазоне изменения относительной влажности и температуры воздуха.

3. Совместное использование разработанных методов прогнозирования, обобщения и аналитического описания данных о равновесном влагосодержании позволяет существенно сократить объем необходимых экспериментальных измерений без существенного снижения точности конечных справочных данных о гигротермическом равновесии КПКМ. В частности, на этом основании построено обобщенное уравнение для равновесных влагосодержаний зерновых и продуктов их переработки, а также выполнено прогнозирование данных о равновесном влагосодержании пищевых продуктов (рыбы, сушеных овощей, фруктов и продуктов их переработки).

4. Составленные на основании разработанных методов прогнозирования, обобщения и аналитического описания системы программ (СП) позволяют унифицировать методологию получения справочных данных о равновесном влагосодержании новых, малоисследованных КПКМ.

5. Построенные в рамках выполненных исследований банки данных о равновесных влагосодержаниях КПКМ позволяют унифицировать теоретические исследования в области сорбции и практические расчеты гигротермических равновесий в системах влажный воздух - продукт при использовании САПР и АСУ технологическими процессами.

6. Рассмотренные в диссертации методики расчета процессов охлаждения мяса, позволяют рассчитывать кинетику процессов охлаждения мяса и, следовательно, оптимизировать эти режимы с целью снижения естественной усушки продукта, а также прогнозировать его убыль при фактических режимах охлаждения, замораживания, сушки, вяления и других гигротермических процессах холодильной и пищевой технологии.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Загоруйко В.А., Кривошеев Ю.И., Слынько А.Г., Слынько Н.А. Разработка формы и метода построения уравнения состояния капиллярно-пористых коллоидных материалов // Промышленная теплотехника. - 1985. - Т. 7. - № 4. - С. 51-54.
2. Загоруйко В.А., Кривошеев Ю.И., Слынько А.Г., Слынько Н.А. Автоматизированный банк данных гигроскопических свойств капиллярно-пористых коллоидных материалов. - М., 1985. - 143 с. - Деп. в МинЗаг СССР. № 567.
3. Загоруйко В.А., Чумак И.Г., Слынько Н.А., Аль-Кераван Бассам, Сибиряков П.В. Гигроскопические свойства мяса. - М., 1990. - 45 с. - Деп. в АгрониИТЭИММП, № 4 (222). - С. 113.
4. Загоруйко В.А., Слынько Н.А., Чумак Н.И., Ахмед Мустафа. Исследование равновесного влагосодержания рыбы в интервале температур от +30 до -20 °С. - М., 1990. - 33 с. - Деп. в ВНИИРХ.
5. Загоруйко В.А., Слынько Н.А., Чумак Н.И., Аль-Кераван Бассам, Ахмед Мустафа Макфуз. Обобщение равновесных влагосодержаний мяса и свежего толстолобика. - М., 1991. - Деп. в АгрониИТЭИММП, № 2 (232). - С. 68.
6. Слынько Н.А., Чумак Н.И. Прогнозирование равновесных влагосодержаний чая. - М., 1991. - 19 с. - Деп. в ВИНТИ 01.02.91. № 504-В91.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

U - равновесное влагосодержание материала при заданных φ и T ;
 $W = \frac{U}{U_{os}}$ - приведенное влагосодержание; U_{os} - значение U при $\varphi = 1$, $T = 273,15$ К; φ - относительная влажность воздуха;
 $C_{mT} = \left(\frac{\partial U}{\partial \varphi}\right)_T$, $C_{m\varphi} = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_\varphi$ - коэффициенты изотермической и изопотенциальной массоемкостей; $\bar{H} = \frac{H}{H_{os}}$ - приведенная ширина эквивалентной поры (H - ширина эквивалентной поры при заданных φ и T ; H_{os} - значение H при $\varphi = 1$ и $T = 273,15$ К);
 $\theta = \left(\frac{T_0}{T} - 1\right)$ - приведенная температура в уравнении равновесного материала; $a, b, n, k, \bar{n}, \bar{k}$ - коэффициенты аффинного преобразования координат подобия; a_{ij} - коэффициенты двухпараметрических уравнений равновесного влагосодержания материалов; G_s - расход воздуха, кг/с; G_m - масса охлаждаемой полутуши, кг; C_p - изобарная теплоемкость воздуха; F_a, F_m - потоки теплоотдачи и массообмена системы продукт-воздух, м²;
 $\zeta = \frac{\lambda}{C_p}$ - коэффициент массоотдачи (закон Льюиса);
 $\eta = \zeta_s + R_n T \ln \frac{1}{\varphi}$ - теплота десорбции, кДж/кг; ζ_s - теплота парообразования при температуре T , кДж/кг; C_u - теплоемкость продукта, кДж/(кг К); a_1 и a_2 - влагосодержание воздуха на входе и выходе из камеры охлаждения, кг вл./кг с.м.; T_1 и T_2 - температура воздуха на входе и выходе из камеры, К; T_p - температура поверхности продукта; a_{ps} - максимальное влагосодержание поверхности продукта, кг вл./кг с.м.

Н. Силин