

Авторефер.  
Ч. 90

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЧУМАК Наталья Игоревна

УДК 621.565.3.1/-9

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА УСУШКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ  
И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ИХ ХОЛОДИЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ

Специальность 05.18.12 - процессы и аппараты пищевых  
производств

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Переучет 1954 г.

Одесса - 1935

Работа выполнена в Одесском технологическом институте холо-  
дильной промышленности и Одесском технологическом институте пше-  
вой промышленности имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель - кандидат технических наук,  
доцент В.П.ОНИЩЕНКО

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Н.В.ОСТАПЧУК,  
кандидат технических наук,  
М.ЧЕРНОЗУБОВ

научно-исследовательский  
исной и молочной промышлен-  
(ев)  
1985 г. в  
ированного совета Д 068.35.01  
ите пищевой промышленности  
са, ул.Свердлова, 112.  
ря в библиотеке Одесского  
омышленности имени М.В.Ло-

1985 г.

А.Ф.Загibalов

ОНАХТ 10.05.12  
Совершенствование ме



v015119

Автореф.  
У

3

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важной практической задачей в деле успеш-  
ного осуществления Продовольственной программы страны является со-  
здание камер холодильников и аппаратов холодильных установок, для  
которых на стадии проектирования задаются характеристики, отвечающие  
требованиям холодильной технологии и обеспечивающие минимальные по-  
тери продуктов.

Существующие в настоящее время методики проектирования камер хо-  
лодильников основаны на расчете температуры воздуха, скорости его  
движения и лишь в некоторых случаях на выборе типа охлаждающей систе-  
мы, а усушка продуктов определяется экспериментально в промышленных  
условиях и часто превышает нормативную, что приводит к необоснова-  
нной потере ценных пищевых продуктов. В методиках расчета величины  
усушки используются неустойчивые во времени и часто зависящие от са-  
мой усушки параметры. Следовательно, для обеспечения задач проекти-  
рования камер хранения и холодильной обработки с заранее заданной  
величиной усушки необходимо совершенствовать методы ее расчета, что  
и определяет важность и актуальность этой проблемы.

Цель работы. Целью работы является разработка более совершен-  
ного метода расчета величины усушки пищевых продуктов в процессах  
их хранения и холодильной обработки, обеспечивающего простоту и за-  
данную точность ее определения, основанного на учете минимального  
числа параметров, характеризующих режимы холодильной технологии,  
исходя из условий обеспечения заданной или допустимой величины  
усушки.

Задачи исследования:

- установить особенности определения тепловлажностных характерис-  
тик для процессов увлажнения и осушения воздуха в камерах холодиль-  
но-хранилищных установок для хранения пищевых продуктов;

Одесский технологический институт пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова  
БИБЛИОТЕКА

v. 0 15119

- установить зависимость усвоенной или отданной воздухом массы влаги от температуры, относительной влажности, давления воздуха и количества отводимой (подводимой) теплоты;
- установить зависимость величины усушки пищевых продуктов от температурно-влажностного режима и состояния поверхности продукта в камерах холодильной обработки и хранения;
- разработать предложения по выбору режимов хранения и холодильной обработки, обеспечивающих заданную или нормативную усушку пищевых продуктов и мероприятия, направленные на повышение эффективности эксплуатации камер хранения и холодильной обработки.

Научная новизна. Разработан универсальный метод расчета усушки пищевых продуктов при их хранении и холодильной обработке, основанный на учете подводимого или отводимого количества теплоты в рассматриваемом процессе, температур, изменения относительной влажности воздуха или равновесной влажности воздуха над продуктом.

Практическая ценность работы. Разработана методика проектирования камер холодильников, в основе которой заложено условие обеспечения заданной нормативной величины усушки пищевых продуктов. Сформулированы мероприятия, направленные на уменьшение естественной убыли продуктов при их холодильной обработке.

Апробация работы. Основные результаты доложены на совещаниях, посвященных холодильной технике и технологии: Всесоюзном семинаре в г. Калининграде, республиканском совещании в г. Москве, IV Национальной научно-технической конференции в НРБ, г. Пловдив, на что имеются ссылки в библиографии диссертационной работы. Сравнительная оценка методов расчета усушки, основанная на использовании тепловлажностного отношения, изложена в главе учебника для вузов / 9 /.

Публикация результатов. По теме диссертации опубликовано 10 статей и получено 2 авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, рекомендаций и списка литературы и приложений, изложенных на 240 страницах машинописного текста, включая 13 рисунков, 16 таблиц, библиографию из 161 наименования, из которых 26 иностранных.

На защиту выносятся положения и научные результаты:

- масса влаги, усвоенная воздухом при холодильной обработке и хранении продукта, зависит от давления, температуры и относительной влажности воздуха и их изменений, а также от количества участвующей в процессе теплоты;
- величину усушки продуктов можно рассчитать с помощью коэффициента влагопереноса, определяющего долю сухого теплообмена в общем или с помощью обратной величины, определяющей долю теплоты, затраченной на массообмен в процессах испарения, конденсации, сублимации или десублимации;
- значения величины коэффициента влагопереноса можно рассчитать по определяющей температуре и равновесной влажности воздуха над продуктом;
- для процессов хранения определяющая температура равна температуре поверхности продукта, которая близка к температуре воздуха камеры;
- для процессов охлаждения и замораживания она равна среднеинтегральному значению температуры поверхности продукта за цикл и для процессов осушения воздуха - температуре точки росы, соответствующей средним значениям температуры и относительной влажности воздуха в воздухоохладителе;
- при изменении температурного режима хранения и холодильной обработки усушка продуктов и масса инея, осаждаемая на поверхности приборов охлаждения, изменяются обратно пропорционально коэффициентам влагопереноса соответствующих режимов;

- при постоянных значениях температуры и относительной влажности среды, количества подведенной или отведенной теплоты в процессе, способность воздуха усваивать влагу не зависит от скорости движения воздуха;

- в процессах увлажнения зависимость способности воздуха усваивать влагу от скорости его движения имеет монотонно возрастающий характер и при температурах выше  $-12^{\circ}\text{C}$  указывает на необходимость искусственного увлажнения воздуха;

- по способности воздуха ассимилировать массу влаги определяют ее количество, которое необходимо подавать в камеру при искусственном увлажнении воздуха.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ литературных источников, относящихся к методам расчета величины усушки пищевых продуктов в камерах хранения и холодильной обработки, который показал, что расчет усушки продуктов ведется по массе влаги, испаряющейся с поверхности продукта, и массе влаги, поглощенной воздухом.

Работы Д.Г.Рютова, Е.С.Курылева, Г.Б.Чижова и др. посвящены описанию первого метода, основанного на законе Дальтона, в которых применяются громоздкие формулы, содержащие большое количество зависимых параметров, что усложняет расчет. Коэффициент испарения  $\beta$  и эффективная поверхность испарения продукта  $F$  получены Д.Г.Рютовым на основании данных небольшого количества опытов, и их значения весьма приближены, что снижает точность предложенных зависимостей. А для случаев насыщения воздуха камеры влагой формулы неприменимы.

Метод, основанный на учете количества поглощенной воздухом влаги, разработанный А.А.Гоголиным, С.Г.Чуклиным, В.З.Жаданом, является более предпочтительным, так как позволяет избежать применения сложных

систем уравнений математической физики. Методы Гоголина А.А. и Чуклина С.Г. позволяют рассчитать массу воды или инея, выпадающих на охлаждающих поверхностях. Расчет тепловлажностного отношения ведется по коэффициенту влаговыпадения, который определяется при известных значениях температуры поверхности охлаждения и относительной влажности воздуха. В случае, когда на поверхности охлаждения выпадает иней, появляются дополнительные затруднения в расчете его толщины и теплопроводности. По этой причине, в расчетах прибегают к усреднению определяемых величин, точность которых для режимов холодильной обработки не удовлетворяет практическим расчетам.

Метод В.З.Жадана позволяет рассчитать массу влаги, которая может быть усвоена воздухом, по тепловлажностному отношению, определяемому по эмпирическим формулам. Эти зависимости справедливы для ограниченного диапазона температур воздуха ( $+15^{\circ}\text{C} \dots -25^{\circ}\text{C}$ ) и условий, когда барометрическое давление равно  $0,1 \text{ МПа}$ , а относительная влажность в процессе остается постоянной и близкой к единице. Как показали проведенные нами расчеты, масса влаги, усвоенная воздухом, может быть равна величине усушки продукта при его хранении, когда температура воздуха близка или равна температуре продукта и относительная влажность воздуха над ним равна единице.

На основе анализа методов расчета усушки и проектирования камер холодильников сделан вывод о необходимости их совершенствования. В заключении главы сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе приведены теоретические основы расчета массопереноса с использованием закономерностей термодинамики для влажного воздуха, определяющих основную характеристику тепловлажностного отношения процесса - величину  $\varepsilon$ , с учетом равновесной влажности воздуха над продуктом

$$\varepsilon = \left( \frac{\partial i}{\partial a} \right)_a \quad (I)$$

где  $a = \varphi, t, p, i$ .

Анализ тепловлажностных характеристик проведен для значений "а" с учетом, что энтальпия  $i$  влажного воздуха зависит от независимых переменных: барометрического давления  $P$ , температуры  $t$ , относительной влажности  $\varphi$  и влагоосодержания  $d$ . В результате получена зависимость для тепловлажностной характеристики произвольного процесса

$$\varepsilon = \varepsilon_{\varphi} + \left( \frac{\partial i}{\partial \varphi} \right)_d \frac{\Delta \varphi}{\Delta d}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{\varphi}$  - тепловлажностная характеристика процессов при  $\varphi = \text{const}$ .

Производная  $\left( \frac{\partial i}{\partial \varphi} \right)_d$  - величина отрицательная и по абсолютному значению равна 10...20 единицам в зависимости от температуры воздуха. В этой связи величина  $\varepsilon$  может быть больше или меньше, либо равна значению  $\varepsilon_{\varphi}$  и существенно зависит от величины и знака  $\frac{\Delta \varphi}{\Delta d}$ . Даже при сколь угодно малых  $\Delta \varphi$  и  $\Delta d$  величина  $\varepsilon$  может значительно отличаться от  $\varepsilon_{\varphi}$ .

В формуле (2) величина  $\varepsilon_{\varphi}$  рассчитывается по зависимости

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{(P - \varphi P^*)}{\varphi P \cdot \left( \frac{\partial P^*}{\partial t} \right)} \left[ c_{c.b.} \frac{R_n}{R_{c.b.}} (P - \varphi P^*) + c_n \varphi P^* \right] + (c_0 + c_n t) \quad (3)$$

Формально  $\varepsilon_{\varphi}$  совпадает с  $\varepsilon_t$  в формуле В.З.Жадана  $\Delta G = \frac{Q}{\varepsilon_t}$ , при условии, когда  $\varphi = \text{const}$  ( $\Delta \varphi = 0$ ). Здесь  $\varepsilon_t$  - тепловлажностная характеристика процесса, зависящая от температуры, при  $\varphi = 1$ . Во всех других случаях, в отличие от  $\varepsilon_t$ , величина  $\varepsilon_{\varphi}$  существенно зависит как от температуры, так и от относительной влажности воздуха. В целом вычисление количества влаги, усвоенной или отданной воздухом  $\Delta d$  или  $\Delta G = m \Delta d$ , может быть проведено по зависимости

$$\Delta G = \frac{Q - m \left( \frac{\partial i}{\partial \varphi} \right)_d \Delta \varphi}{\varepsilon_{\varphi}} \quad (4)$$

Уравнение (4) подтверждает, что  $\Delta G$  определяется не общими

теплопритоками, а соотношением между различными их долями, чего нельзя учесть введением различных коэффициентов эффективности. Из (4) также следует, что  $\Delta G$  зависит от четырех величин:  $Q$ ,  $m$ ,  $t$  и  $\Delta \varphi$ , которые, к сожалению, во всех опубликованных в литературе экспериментальных исследованиях одновременно не измерялись (помимо  $Q$ ,  $m$ ,  $t$ ,  $\Delta \varphi$  существенную роль играют и изменения общего барометрического давления  $P$ ). Зависимость  $\Delta G$  от температуры в неявном виде выражена через  $\varepsilon_{\varphi}$ .

Исходя из выражения для энтальпии воздуха, нами получена еще одна зависимость для определения  $\Delta G$

$$\Delta G = \frac{Q - m c_{d.} \Delta t}{z(t)}, \quad (5)$$

где  $c_{d.} = c_{c.b.} + c_n d$ , для  $t_x > 0^\circ\text{C}$   $z(t) = 2500 - 2,38 t$ ,  
для  $t_x < 0^\circ\text{C}$   $z(t) = 2835 - 2,38 t$ .

В отличие от (4), в (5) член  $m c_{d.} \Delta t$  имеет четкий физический смысл, как "сухая" часть  $Q_c$  общих теплопритоков  $Q$  к воздуху.

Поскольку  $\Delta t$  измеряется с большей точностью по сравнению с  $\Delta \varphi$ , формула (5) предпочтительнее формулы (4) тем более, что она допускает возможность выделения "влажной" части общих теплопритоков ( $Q_{d.} = Q - Q_c$ ). Уравнения (4) и (5) указывают на идентичность рассматриваемых здесь двух подходов к расчету  $\Delta G$ , если  $\Delta \varphi$  определяется через  $Q$ ,  $m$  и  $\Delta t$ .

Для нестационарного процесса тепло- и массообмена, например для холодильной обработки, количество влаги  $\Delta G$ , усвоенное воздухом за время  $\tau$ , равно

$$\Delta G = \frac{q(\tau) - m \left( \frac{\partial i}{\partial \varphi} \right)_{d,p} \cdot \varphi(\tau)}{\varepsilon_{\varphi}} \Delta \tau \quad (6)$$

Аналогичное выражение получено, когда в качестве независимых переменных выбирают  $P$ ,  $t$ ,  $d$ .

В полученном соотношении  $\varphi'(t)$  характеризует закономерность изменения относительной влажности воздуха во времени в процессе,

$q(t)$  - изменение теплового потока во времени к воздуху массой  $m$ .

Оценку  $\Delta G$  можно провести, используя средние значения  $\varphi$ ,  $t$ ,  $q$  за весь процесс или отдельные промежутки времени холодильной обработки. Это можно осуществить с помощью обратной величины коэффициента влагопереноса  $1/\xi_d$ , по формуле (5) или по методике, изложенной в работе [6], в основе которой лежит постоянное значение  $\xi_{d_0}$ , соответствующее началу процесса, и экспериментально определенной величины  $\xi_d$  - безразмерного значения тепло-влажностного отношения, величина которого соответствует

$$\xi_d = \frac{\xi_{d_0}}{\xi_d}$$

В формуле (5) соотношения "сухого"  $Q_c$  и "влажного"  $Q_{d_0}$  количества теплоты в общем ее количестве  $Q$  рассчитываются по коэффициенту влагопереноса  $\xi_d = Q / Q_{d_0}$ ; для  $\xi_d$  справедлива строгая формула  $\xi_d = \varepsilon / \varepsilon(t)$

Известные формулы А.А.Тоголина, С.Г.Чудина позволяют установить связь величины  $\xi_d$  с коэффициентом  $\varepsilon$

$$\xi_d = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}$$

Соотношение (4) указывает на принципиальную несхожесть процессов усвоения влаги воздуха ( $\Delta\varphi > 0$ ) и его осушения ( $\Delta\varphi < 0$ ), что характеризует различие этих физических процессов, так и способов оценки  $\xi_d$  для них. В работе установлено, что для процесса осушения воздуха определяющей температурой при вычислении  $\xi_d$  является температура точки росы, определяемая по средним значениям  $t$  и  $\varphi$

воздуха в аппарате (воздухоохладителе); для процессов увлажнения определяющей температурой является температура воздуха по мокрому термометру, определяемая по среднеинтегральной температуре поверхности продукта и относительной влажности воздуха, соответствующей равновесному состоянию его над продуктом.

В нашей работе в табличной форме приведены расчетные значения величины  $1/\xi_d$  в зависимости от  $t$ ,  $\varphi$ ,  $P$  в диапазоне изменения  $P = 20 \dots 600$  кПа и  $t = +50 \dots -50^\circ\text{C}$  при условии  $I \approx \varphi = 0,4$ . Графическая зависимость  $1/\xi_d$  для барометрического давления  $P = 98,1$  кПа показана на рис.1.

Величина  $1/\xi_d$  определяет долю общих теплопритоков, затрачиваемую на испарение воды, сублимацию или десублимацию льда (инея).

Полученные значения  $1/\xi_d$  могут быть использованы для расчета массы влаги, воспринятой воздухом за процесс или отданной воздухом приборам охлаждения

$$\Delta G = \frac{Q \cdot 1/\xi_d}{\varepsilon(t)} \quad (7)$$

Усушку мяса в режимах хранения и холодильной обработки предложено рассчитать по теплоте, отводимой приборами охлаждения конвективным теплообменом

$$\Delta G = \frac{(Q - Q_p)(1 - 1/\xi_d)}{\varepsilon_p - \varepsilon(t)} = \frac{\Delta F(\bar{t}_n - \bar{t}_x)r}{(\xi_d - 1)\varepsilon(t)} = \frac{Q_c}{(\xi_d - 1)\varepsilon(t)} \quad (8)$$

Для холодильной обработки при  $Q = Q_2 = G_n \Delta i$  и  $Q_p = 0$  изменение величины усушки мяса в зависимости от режима охлаждения или замораживания можно оценить из соотношения  $\Delta G_1 / \Delta G_2 = \xi_{d_2} / \xi_{d_1}$ , а при изменении режима работы воздухоохладителя -  $\frac{\Delta G_1}{\Delta G_2} = \frac{Q_{01} \cdot \xi_{d_2}}{Q_{02} \cdot \xi_{d_1}}$ .

В диссертации приведена методика расчета количества участвующей в процессе теплоты. Особое внимание уделено расчету доли радиационной составляющей и количеству перехваченной теплоты, поступающей через

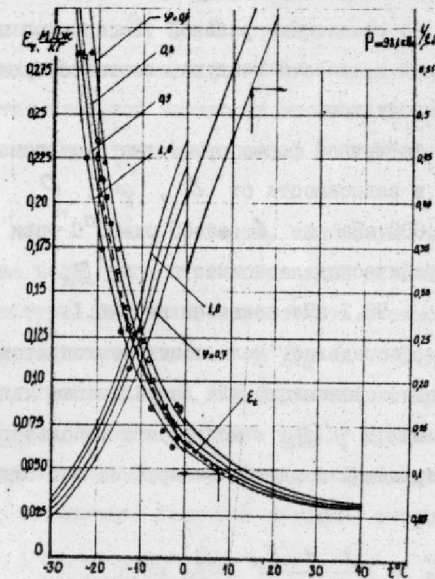


Рис. I. Зависимость термовлажностного отношения  $\epsilon_{\varphi}$  и  $1/\epsilon_d$  от температуры воздуха при различных значениях  $\varphi$  и  $\rho = const.$

- - А.П.Шейфер;    ○ - С.Г.Чуклин;    ● - А.П.Еркин;  
 □ - Н.И.Чумак.

наружные ограждения.

Для уменьшения усушки в процессах доохлаждения, дозамораживания и хранения применяют установки увлажнения воздуха. В этом случае усушку можно рассчитать по зависимости

$$\Delta G_i = \frac{q_i (1 - \theta_p)}{\epsilon_{d_1} (z - ct_x)} \left( 1 - \frac{\epsilon_{d_2} - \epsilon_{d_1}}{\epsilon_{d_1}} \right) \quad (9)$$

Здесь  $\epsilon_{d_1}$ , для условий  $t_n$  и  $\varphi_{p1}$  у продукта,  
 $\epsilon_{d_2}$  - для условий  $t_n$  и  $\varphi_{p2} > \varphi_{p1}$ .

В третьей главе приведены результаты расчетов усушки по полученным зависимостям и их сопоставление с экспериментальными данными, полученными в камере хранения, оборудованной воздушным охлаждением, холодильника мясокомбината г.Первомайска и в морозилках холодильника Одесского мясокомбината. Для сравнения использовали экспериментальные данные С.Г.Чуклина, И.В.Бушты и Д.Г.Рютова для камер хранения мороженых грузов, А.П.Еркина - по результатам испытаний камер холодильной обработки с радиационно-конвективным теплообменом; С.Г.Чуклина, А.П.Шейфера - для камер однофазного замораживания мяса с воздушным охлаждением и П.Г.Красномовца, А.П.Копыбинского - для камер замораживания птицы под избыточным давлением.

Экспериментальные исследования режимов хранения проводили в камере емкостью 800 т. Охлажденный воздух после воздухоохладителя поступал через решетчатые проемы, расположенные вдоль длинных сторон камеры. Опытные партии мяса хранили в июле-сентябре 1976 г. (1776 часов). Общая масса заложеного груза составила 680 т (заполнение камеры 85%).

Во время испытаний измеряли: температуры воздуха в объеме камеры и на техническом этаже, мяса в штабеле, кипения хладагента; поля скоростей движения воздуха в течение периода закладки, хранения и выгрузки; усушку мяса. Контрольные штабеля были двух видов: укрытые брезентом и открытые.

Температуру измеряли медь-константановыми термопарами, ртутными термометрами (с ценой деления  $0,1^{\circ}\text{C}$ ) и недельными термографами.

Опытные партии мяса были сформированы в четыре штабеля: два - из говядины и два - из мясной свинины. Мясо взвешивали партиями по 5 полутуш говядины или 24 полутуши свинины, каждая из которых имела свой номер. Температура воздуха в камере поддерживалась  $-17,5 \dots -18,0^{\circ}\text{C}$ , среднесуточные изменения температуры воздуха составляли  $0,8 \dots 1,0^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность воздуха в процессе хранения  $\varphi = 0,86$ . Погрешность эксперимента

при определении массы мяса от усушки составляет для комиссионной оценки 20%, при взвешивании отдельных образцов (почтовые весы) - 1,5%. Экспериментальные данные по усушке продуктов при их хранении представлены в таблице I.

Экспериментальные исследования по охлаждению и замораживанию мяса проводили в туннеле с поперечной циркуляцией воздуха, распределяемого через вертикальные, плоские щели с направляющими кромками. Для каждого опыта в туннеле размещали три полутуши (говядина первой, второй и третьей категории, свинина с различным содержанием жира и баранина). Масса полутуш говядины составляла 50...130 кг, свинины - 20...80 кг, а туш баранины - 8...30 кг. Температуру измеряли медь-константановыми термомпарами с точностью 0,1°C.

Температуру полутуш измеряли на поверхности и по толщине бедра через каждые два сантиметра до его центра. Взвешивали полутуши на почтовых весах ВП-150 ШЗ, с точностью ± 5 г, до начала эксперимента, через равные промежутки времени в процессе его охлаждения и обязательно при достижении на поверхности полутуши температуры -1,5°C и в конце процесса при температуре центра -6...-8°C. Среднеобъемную температуру полутуш определяли после выравнивания температуры в толще мышц бедра спустя 48...72 часа после завершения процессов охлаждения или замораживания.

Скорость воздуха измеряли у полутуш и в объеме туннеля с помощью многоточечного термоанемометра (10 точек) и крыльчатым анемометром АСО-3. При скоростях движения воздуха более 5 м/с - чашечным анемометром МС-13. Температура в камере поддерживалась в зависимости от технологического режима: от +5,0 до -25,0°C.

Значение относительной влажности изменяли в пределах 85...98%. Тепловые потоки измеряли с помощью миниатюрных слойных датчиков, конструкции АН УССР, выходной сигнал был выведен на микроампероммилли-вольтметр самопишущий многопредельный Н399.

Таблица I

Экспериментальные данные по хранению мяса на Первомайском мясокомбинате

Продукт	Масса, т	ΔG за 1776 ч (III квартал)	
		по нормам	фактическая
		кг	%
Говядина	650,0	5785,0	0,89
Говядина (контроль)	40,269	358,4	0,89
			0,945
			6129,0
			379,7

Таблица 2

Предварительное охлаждение

$B_i = 10; z_n^c = 0,269 \text{ ч}; \Delta z = 162 \text{ с}; T_c = -20^\circ\text{C}; z_n^m = 0,4804 \text{ (при } f = 0,56) \text{ час}; G = 80 \text{ кг}; R = 0,1 \text{ м}; F = 1,21 \text{ м}^2$

$z_n^c$ , час	$z_n^m$ , час	$T_n$ , °C (при $f = 0,56$ )	$T_v$ , °C (при $f = 0,56$ )	$\Delta Q_i$ , кДж (по гра-педиям)	$-m_c \Delta T \left(\frac{d}{d_0}\right) \text{эф.}$ , кДж	$\Delta G_i$ , %	$\Delta G$ , %
0,0006	0,00107	33,73	37,98	257,1	35,0	0,0173	0,034
0,0454	0,08107	12,35	36,49	342,9	71,8	0,0245	0,025
0,0902	0,16107	6,87	35,37	293,9	71,8	0,0216	0,022
0,1350	0,24107	3,67	43,40	264,6	71,8	0,0199	0,020
0,1798	0,32107	1,46	33,50	242,8	71,8	0,0186	0,019
0,2240	0,40000	-0,20	32,70	224,4	71,8	0,0175	0,018
0,2690	0,48040	-1,50	32,03	107,6	35,9	0,0085	0,017

$\sum \Delta Q_i = 1733,3 \text{ кДж} \quad \sum \Delta G_i = 0,13\%$

Сопоставление экспериментальных данных по холодильной обработке приведено в таблице 2, в таблице 3 - обработка экспериментов А.П.Копыбинского и П.Г.Красномовца и в таблице 4 - обработка экспериментов А.П.Еркина.

Анализ экспериментальных данных и результатов расчета позволили установить, что предлагаемый метод для расчета усушки и определения тепловлажностных характеристик камеры и приборов охлаждения дает удовлетворительную сходимостъ расчетных значений с экспериментальными данными. Анализируя расчетные величины усушки мяса для режимов интенсивного охлаждения для условий  $t_k = 0 \dots -15^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,1 \dots 5,0$  м/с,  $\varphi_H = 0,75 \dots 1,0$ , установили, что при  $\varphi = \text{const}$  и  $Q = \text{const}$  способность воздуха усваивать влагу не зависит от скорости движения воздуха, а усушка продуктов зависит от температуры и равновесной влажности воздуха над продуктом. С увеличением  $\Delta\varphi$  влияние скорости движения воздуха становится значительным.

Экспериментальные данные по усушке, проведенные совместно с А.С.Подмазко (рис.1), позволяют сделать вывод, что  $\varphi_H$  над продуктом в диапазоне температур поверхности от  $-3^\circ\text{C}$  до  $-25^\circ\text{C}$  изменяется в пределах от 0,85 до 0,70.

В четвертой главе изложено практическое приложение теоретических и экспериментальных исследований. Для получения нормативной усушки пищевых продуктов  $\Delta G_H$  в процессах холодильной технологии, при проектировании камер холодильников необходимо вначале определять температуру поверхности продуктов ( $t_n$  или  $\bar{t}_n$ ) из условия  $\bar{\epsilon}_d = Q / \Delta G_H \cdot \alpha(t)$ , а затем определить температуру и скорость движения воздуха, обеспечивающих необходимую величину  $t_n$  в процессах хранения, охлаждения или замораживания пищевых продуктов. Для камер хранения рекомендуется воздушное охлаждение со специальным воздухо-распределением и увлажнением воздуха с установкой вентиляторов до воздухоохладителя, то есть система, позволяющая отводить раздельно внут-

Таблица 3

Зависимость усушки от давления (экспериментальные данные П.Г.Красномовца)

№-п/п	$P$ , МПа	$t_{\text{г.с}}$ , °C	$t$ , °C	$\Delta G_{\text{г.с}}$ , %	$t_{\text{н.н.}}$ , °C	$t_{\text{н.к.}}$ , °C	$\Delta t$ , КДж/кг	$Q$ , КДж	$\epsilon_{\text{р}}$ , КДж/кг	$\varphi$	$\Delta G_{\text{р}}$ , %
1	0,515	-13	4,25	0,25	+20	-8	289,5	$289,5 \cdot 10^3$	11581,9	0,5	0,249
2	0,392	-20	3,10	0,27	+20	-8	289,5	$289,5 \cdot 10^3$	107311,0	0,6	0,269

Таблица 4

Расчетные и опытные значения  $\Delta G$  (эксперимент А.П.Еркина)

Система охлаждения	Вместимость воздуха камер		Воздух камер		$\bar{t}_0$ , °C	$\bar{t}_n$ , °C	$Q$ , КДж/т	$1/\bar{\epsilon}_d$	$\Delta G_{\text{р}}$		$\Delta G_{\text{оп}}$	
	$F$ , т	$\varphi$ , %	$\bar{t}_0$ , °C	$\bar{t}_n$ , °C					%	кг	%	кг
Радиационно-конвективная	45	-25	0,95	-	-19,7	202000	0,123	0,869	390,9	0,87	391,5	
То же	45	-22	0,95	-32	-27,0	260400*	0,083	0,82*	367,0	0,87*	391,5	
То же	0,0813	-23	0,80	-	-10,3	110381	0,238	0,92	0,748	0,898	0,730	

\* - здесь  $Q = Q_2 + Q_{\text{вент.}}$  $\Delta G$  - количество осаждаемого инея на приборах.

рение и наружные теплопритоки.

В камерах хранения с воздушным охлаждением установка экранов с воздухозаборными отверстиями вдоль теплых ограждений позволяет отобрать часть теплоты непосредственно в продухах, что уменьшает усушку хранимого мяса (а.с.№ 807005). Дальнейшее уменьшение усушки возможно достигнуть при увлажнении воздуха в камере (а.с.№ 792027). Внедрение предложений по авторским свидетельствам осуществлено в опытной камере холодильника Первомайского мясокомбината.

Для камер холодильной обработки подтверждена необходимость организации обработки мясopодуктов в потоке по стадиям с отличающимися между собой температурами и скоростью движения воздуха, с целью обеспечения большой скорости охлаждения и замораживания мяса.

Так как усушка мяса при холодильной обработке пропорциональна количеству отведенной от него теплоты в течение всего времени процесса, то целесообразно организовать отвод теплоты таким образом, чтобы в начале процесса охлаждения была низкая температура воздуха ( $-10 \dots -30^{\circ}\text{C}$ ), при скорости движения, обеспечивающей достижение на поверхности полутопи температуры  $-1,5^{\circ}\text{C}$  в процессе прохождения мяса по туннелю. Для уменьшения влияния скорости движения воздуха его целесообразно увлажнять для достижения условий насыщения или перенасыщения его влагой.

При поточном замораживании мяса необходимо поддерживать низкие температуры воздуха, применять системы с большой долей радиационной составляющей.

Методика расчета усушки мяса использована в рекомендациях по проектированию туннелей предохлаждения, выданных Минмясомолпрому УССР.

#### ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

I. Научно обоснован способ расчета тепловлажностной характеристики процесса по коэффициенту влагопереноса. Показано, что усушка находится в прямой зависимости не только от средней температуры поверхнос-

ти продукта, но и равновесной влажности воздуха над поверхностью.

2. Разработан более совершенный метод расчета усушки пищевых продуктов при их холодильной обработке и хранении по тепловлажностной характеристике процесса, выраженной через коэффициент влагопереноса.

3. Установлено, что коэффициент влагопереноса определяется:

- для процесса увлажнения - по температуре воздуха, соответствующей средней температуре поверхности продукта или пленки жидкости и относительной влажности воздуха над ними;
- для процесса осушения - по температуре, равной температуре точки росы, соответствующей средней температуре воздуха в аппарате;
- среднее значение коэффициента влаговыпадения определяется по значениям коэффициента влагопереноса.

4. Установлено, что в полученных зависимостях  $\Delta G = f(a, q, t, P, \varphi, \Delta t, \Delta \varphi)$  реальные приращения  $\Delta \varphi$  определяют усушку продукта (при  $\Delta \varphi = 1 - \varphi_n$  - максимальную усушку пищевых продуктов, а при  $\varphi_n - \varphi_n$  - действительную их усушку); значения  $\Delta \varphi = 1 - \varphi_n$  приводят к величине максимальной способности воздуха воспринимать или отдавать влагу.

Минимизация способности воздуха усваивать влагу является одним из условий выбора оптимальных режимов холодильной обработки среди других возможных, особенно при решении задач проектирования камер (туннелей).

5. Установлены закономерности изменения усушки пищевых продуктов от температуры воздуха в камере. Теоретически подтверждена необходимость выделения стадий предохлаждения и предзамораживания мяса в туннелях для камер холодильной обработки с циклической загрузкой, так как температура поверхности продукта и средняя температура воздуха в аппаратах снижаются, что приводит к уменьшению естественной убули.

6. Теоретически показано, что в начале холодильной обработки наблюдается максимальная усушка и для ее уменьшения необходимо выделять отдельную стадию холодильной обработки с температурными режимами,

обеспечивающими максимальную интенсивность теплообмена между воздухом и продуктом. Уменьшение усушки достигается за счет быстрого снижения температуры поверхности продукта и средней температуры воздуха в аппаратах.

7. Дальнейшие исследования в области процессов массообмена пищевых продуктов с применением закономерностей термодинамики должны быть направлены на изменения относительной влажности воздуха в камере (туннеле), определение равновесной влажности воздуха у поверхностного слоя продукта в зависимости от режимов холодильной обработки, что позволит определять действительную потерю продуктов, а не максимальную возможность воздуха усваивать влагу.

8. Разработана методика расчета и проектирования камер холодильной обработки на примере туннеля, режимы работы которого обеспечивают заданную нормативную усушку.

9. Результаты работы использованы Минмясомолпромом УССР при анализе причин повышенной усушки мяса в камерах холодильной обработки, а также при разработке технических решений по модернизации действующих холодильников мясокомбинатов 50 и 100 т/смену.

На холодильнике Первомайского мясокомбината построена и пущена в эксплуатацию экспериментальная камера хранения мороженого мяса с воздушным охлаждением и увлажнением воздуха, в которой обеспечивается нормативная усушка мяса при  $t_x = -20^{\circ}\text{C}$ .

По теме диссертации опубликованы работы:

1. Хранение мороженого мяса в камерах с воздушным охлаждением / Д.Н.Ильинский, С.Н.Роговая, А.Т.Борщ, Н.И.Чумак - Холодильная техника, 1977, № 2, с.40-42.

2. Коханский А.И., Чумак Н.И. Математическая модель камер хранения дышащих грузов. - В кн.: Математическое моделирование и системный анализ теплообменного оборудования, Киев:Наукова думка, 1978,

с.326...331.

3. Мнапаканов Г.К., Бушта И.В., Чумак Н.И. Процессы тепло- и массообмена в камерах хранения мороженных грузов. - Холодильная техника, 1978, № 12, с.22...26.

4. Чумак Н.И. Особенности процессов массообмена при охлаждении и замораживании мяса. - В кн.: Тезисы докладов семинара по холодильной технике и технологии "Пути повышения эффективности получения и использования искусственного холода", М., 1978, с.33.

5. Чумак Н.И., Роговая С.Н. К сравнительной оценке методов охлаждения и замораживания мяса. - В кн.: Сборник трудов XXIV Европейского конгресса научных работников мясной промышленности, Кульмбак, 1978, с. 98...100.

6. Роговая С.Н., Мнапаканов Г.К., Чумак Н.И. К расчету усушки мяса при его холодильной обработке. - Холодильная техника, 1979, № 1, с.40...42.

7. А.с.№ 792027 (СССР). Устройство для тепловлажностной обработки воздуха /Красномовец П.Г., Островский Н.И., Чумак Н.И. и др. - Опубли. в Б.И. 1980, № 48. с. 45.

8. А.с.№ 807005 (СССР). Холодильная камера для хранения пищевых продуктов /Красномовец П.Г., Островский Н.И., Чумак Н.И. и др. - Опубли. в Б.И. 1981, № 7. с. 72.

9. Чумак Н.И. Процессы тепло- и массообмена при холодильной обработке и хранении продуктов. - В кн.: Чумак И.Г., Чепурненко В.П., Чуклин С.Г. Холодильные установки. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 344 с.

10. Чумак Н.И., Онищенко В.П. Анализ тепловлажностных процессов в камерах холодильников. - В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного семинара "Использование искусственного холода для сокращения потерь пищевых продуктов - важное средство в решении Продовольственной программы страны", Калининград, 1983, с.12.

11. Чумак Н.И., Онищенко В.П. Анализ тепловлажностных процессов в камерах хранения неупакованных грузов. - Холодильная техника, 1984, № 2, с.16...20.

12. Чумак Н.И., Онищенко В.П. Усушка мяса при охлаждении и замораживании. - В кн.: Холодильная техника и технология, Киев, 1984, вып.39, с.85...90.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $\varepsilon$  - тепловлажностное отношение, кДж/кг;  
 $Bi$  - критерий Био;  $i$  - удельная энтальпия воздуха, кДж/кг;  
 $d$  - влагосодержание, кг/кг.с.в.;  $t$  - температура, °C;  
 $\tau$  - время, час;  $R$  - газовая постоянная, толщина, м;  
 $P$  - барометрическое давление, кПа;  
 $p''$  - парциальное давление водяных паров, кПа;  
 $c$  - удельная теплоемкость, кДж/(кг. К);  
 $\lambda$  - скрытая теплота испарения, сублимации, кДж/кг;  
 $m$  - масса воздуха, кг;  $v$  - скорость, м/с;  
 $G$  - масса продукта, кг;  $F$  - поверхность продукта, м<sup>2</sup>;  
 $\Delta G$  - усушка, количество массы влаги, усвоенное воздухом, кг;  
 $Q$  - количество теплоты, кДж;  
 $\xi$  - коэффициент влаговыпадения;  $\gamma$  - коэффициент гомохронности;  
 $\theta$  - доля радиационного теплообмена;  $\varphi$  - относительная влажность воздуха; равновесная влажность воздуха над продуктом;  
 $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>. К).

#### Подстрочные обозначения

с.в. - сухой воздух; с. - среда, сухая; п. - поверхность, продукт, пар; и. - объем; к. - камера, конечный, конвективный; р. - равновесный, радиационный, расчетный, расчет; оп. - опыт; н. - начальный, нормативный; вл. - влажный; в. - воздух; вент. - вентилятор.

#### Надстрочные обозначения

пл. - пластина; б. - бедро; - - среднее значение.

Чумак

БР 00972. Подп. к печати 3.09.85 г. Формат 60 x 84 1/16.  
 Объем 0,9уч.изд.л., 1,25 п. л. Заказ № 3814. Тираж 100.  
 Гортинотипография Одесского облполиграфиздата, цех № 3,  
 Ленина, 49.