

АБторефер
Ф 20

А. Проф. Чайковскому В.А.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

ФАМ ВАН БОН

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАМЕР
ЗАМОРАЖИВАНИЯ МЯСА**

(Специальность 05.04.03—Гидравлические машины,
машины и аппараты холодильной и криогенной техники)

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Пересчет 19 87

ОДЕССА — 1976

Автореферат

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

ФАН ВАН БОН

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАМЕР
ЗАМОРАЖИВАНИЯ МЯСА

(Специальность 05.04.03 - гидравлические машины,
машины и аппараты холодильной и криогенной техники)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОНАХТ Автореферат
Теоретические основы



v 014410

г. Одесса - 1975 г.

v 014410
Автор. / Фан Ван Бон
Ф. 20 / Теорет. ос.
проектир. /
v 014410

14

Поверніть книгу не пізніше
зазначеного терміну

Работа выполнена на кафедре холодильных установок Одесского технологического института холодильной промышленности.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор И.Г.ЧУМАК.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор В.А.НАЕР, кандидат технических наук Д.Н.ИЛЬМИНСКИЙ.

Ведущее предприятие - УКРГИПРОМЯСОМЛПРОМ.

Автореферат разослан " " 1975 г.

Защита диссертации состоится "18" сентября 1975 г.

в 1500 часов на заседании Ученого Совета факультетов холодильной и криогенной техники Одесского технологического института холодильной промышленности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять в Совет института по адресу: 270000, г.Одесса - ГСП, ул.Петра Великого, 1/3.

Ученый секретарь

Совета факультетов холодильной и криогенной техники

доц. ЛИЖНИЦКИЙ Г.В.

Одесский технологический институт пищевой промышленности

БИБЛИОТЕКА

ВВЕДЕНИЕ

С ростом производства и расширением базы мясной промышленности увеличивается емкость и мощность производственных и распределительных холодильников. Например, среднегодовое производство мяса (убойный вес в млн.тонн) за время 1961-1965 гг. составляет 9,3, а в 1966-1970 гг. и 1971-1975 гг. - соответственно 11,6 и 13,7. В 9-й пятилетке намечено построить 90 мясокомбинатов с общей мощностью 4373 тонны мяса в смену. Емкость холодильников, принадлежащих только Министерству мясо-молочной промышленности, до 1976 г. составит 1,350 млн.тонн, т.е. на 30,6 % больше, чем в 1970 году.

Охлажденное мясо по своему качеству лучше, чем замороженное, поэтому в мясной промышленности существует тенденция к увеличению относительной доли охлажденного мяса в общей его годовой выработке.

Однако емкость морозилок и камер хранения мороженого мяса составляет до 30 % общей емкости холодильников и в последнее время равна около 4 млн. усл.тонн.

В ближайшем будущем замораживание парного мяса остается важным способом холодильной обработки для последующего его хранения в мороженом виде. Поэтому вопросы совершенствования термической обработки мяса на всех стадиях являются актуальными.

Технология однофазного замораживания парного мяса, разработанная и исследованная в ВНИИМП, ОТИ.Л, ВНИИХ и внедренная на 240

из 507 комбинатах Министерства мясо-молочной промышленности (т.е. около 50 % ежедневной производительности всех морозилок страны), способствовала техническому прогрессу в холодильной технике, принесла большой экономический эффект, способствовала развитию охлаждающих систем и технологии. В настоящее время она требует дальнейшего совершенствования с целью еще большего сокращения весовых потерь и интенсификации процесса замораживания.

В этом плане работы Укрниимясомолпрома внесли большой вклад в дальнейшую интенсификацию однофазного замораживания мяса за счет создания непрерывного потока в течение всего цикла замораживания, что также уменьшило и естественные потери от усушки. Создание технологических потоков в блоке камер термической обработки открывает путь к полной автоматизации управления производственными процессами.

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному изучению и совершенствованию технологии и выработке технических решений для его осуществления.

Практическая ценность работы

Полученные в работе результаты позволяют обоснованно организовать технологические процессы с учетом практических особенностей промышленности. Внедрение новой технологической стадии предзамораживания в однофазное замораживание позволит сократить время достижения температуры 263 K (-10°C) на поверхности мяса с $10 + 15$ часов до $1 + 3$ часов, в сравнении с камерами однофазного замораживания с циклической загрузкой. Это, естественно, сократит общее время цикла замораживания, т.к. появится замороженный слой продукта, обладающий меньшим тепловым сопротивлением, кроме того,

позволит уменьшить общую весовую потерю мяса еще на $20+30\%$. В работе рекомендована методика проектирования камер поточного замораживания.

Новая технология замораживания с применением предзамораживания мяса совместно с технологией программного охлаждения, разработанной кафедрой холодильных установок, была принята в последних, совместно выполненных проектах ОТИХП, Укрниимясомолпром и Укргипромясо по заказам Министерства мясной и молочной промышленности СССР и УССР и рекомендована для совершенствования типовых проектов мясокомбинатов № 1872 и 2056 с производительностью ЦПП 50 т/смену. Работа также была рассмотрена на научно-технических Советах Минмясомолпрома СССР и РСФСР (1975г.) и одобрена для внедрения на холодильнике опытно-автоматизированного мясокомбината производительностью ЦПП 100 т/смену для города Тернополя.

Научная новизна

С помощью метода аппроксимации линий температурного распределения в пластике типа Вейника А.И. и интегрального преобразования типа Лейбензона Л.С. получено решение задачи теплопроводности при наличии фазового превращения воды в лед в процессе замораживания мяса. Решение применимо для расчета времени и теплового потока предзамораживания и последующего фронтального замораживания.

Для расчета весовой потери мяса использован квазистационарный метод применительно к задаче массообмена. Теоретическое решение корректируется полуэмпирическим поправочным коэффициентом.

Впервые предложены методики расчета динамики загрузки камер поточного охлаждения и замораживания при различных способах ор-

гаиизации подачи мяса в камеру, динамики теплового потока от мяса к воздуху и динамики тепловой нагрузки холодильных машин, работающих на морозилки.

Данную методику расчетов можно рекомендовать для проектирования автоматической системы управления технологическим процессом блока камер термической обработки и машинного отделения.

А п р о б а ц и я

Результаты исследования докладывались на областной научно-технической конференции ОТИХП, посвященной 250-летию АН СССР, 1974г., на I-й национальной научной конференции (г.Пловдив, Болгария, 1974г.), на секциях холодильной промышленности научно-технических Советов Минмясопрома СССР и РСФСР (1975г.). Основное содержание работы опубликовано и принято к публикации в различных журналах и издательствах.

Задачи исследования

В задачи настоящего исследования в' одило :

1. Провести теоретические исследования процессов теплообмена в отдельных стадиях процесса замораживания (предохлаждение, предзамораживание, последующее замораживание...). Получить теоретические зависимости для тепловых расчетов технологических процессов термообработки.

2. Обосновать теплотехнические параметры для камер (или туннелей) предзамораживания и последующего замораживания .

3. Исследовать новую технологию однофазного замораживания мяса и на их основе дать предложение по совершенствованию этих процессов и уменьшению потерь массы мяса от усушки.

4. Провести лабораторные испытания стадии предзамораживания и определить для нее основные зависимости для расчета процесса теплообмена.

5. Дать рекомендации к методике проектирования камер по точного замораживания мяса.

Диссертация написана на русском языке, состоит из 128 страниц текста, 32 рисунков, 36 таблиц , 4 приложений .

Задача теплопроводности в процессе замораживания

Процесс замораживания мяса относится к классу задач теплопроводности с фазовым превращением внутри тела (задача Стефана) и задачам нестационарного конвективного теплообмена на поверхности (сопряженной задаче). Для упрощения решения так же, как в известных решениях, нами рассматривается одномерная задача теплопроводности с граничными условиями третьего рода.

По математической постановке задачи подстадия предзамораживания и процесс замораживания одинаковы. Поэтому ниже приводится общее их решение.

Дифференциальные уравнения теплопроводности внутри тела (пластины) при наличии фазового превращения воды можно записать:

-для затвердевшего слоя

$$\frac{\partial T_1(x,\tau)}{\partial \tau} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1(x,\tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, 0 \leq x \leq \xi; \quad (1)$$

-для немороженого слоя

$$\frac{\partial T_2(x,\tau)}{\partial \tau} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2(x,\tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, \xi \leq x \leq R. \quad (2)$$

Система дифференциальных уравнений (1) и (2) решается при граничных условиях третьего рода на поверхности и теплового баланса на границе раздела фаз.

Теплофизические коэффициенты приняты как средние значения, постоянные для данной зоны, и определяются по среднеобъемной температуре.

Если значения $T_1(x, \tau)$ и $T_2(x, \tau)$ необходимо получить в виде аналитических функций, то решение этой задачи сопряжено с большими математическими трудностями. Популярный путь ее решения, известный в литературе, заключается в подборе подходящих функций $T_1(x, \tau)$ и $T_2(x, \tau)$, после чего определяются коэффициенты - постоянные из начальных и граничных условий.

По Вейнику А.И. распределение температуры в замороженном слое вообще изменяется по параболическому закону с показателем степени при множителе $(1 - \frac{x}{\xi})$ порядка n_1 . Тогда, исходя из граничных условий теплообмена третьего рода, можно записать, что

$$T_1(x, \tau) = T_{кр} + \frac{T_c - T_{кр}}{1 + \frac{n_1 \lambda_1}{\alpha \xi}} \left(1 - \frac{x}{\xi}\right)^{n_1}, \quad 0 \leq x \leq \xi. \quad (8)$$

Аналогично зависимость $T_2(x, \tau)$ также подчиняется параболическому закону с показателем степени " n_2 "

$$T_2(x, \tau) = T_H + \frac{T_{кр} - T_H}{R} \left[\xi + \frac{(R-x)^{n_2}}{(R-\xi)^{n_2-1}} \right], \quad \xi \leq x \leq R. \quad (4)$$

Для уточнения расчета вместо граничного условия теплового баланса на границе фаз было принято интегральное преобразование типа Лейбенсона Л.С.

$$\varepsilon W \omega_1 \delta_1 \frac{d\xi}{d\tau} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} + c_1 \delta_1 \int_0^{\xi} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} dx + c_2 \delta_2 \int_{\xi}^R \frac{\partial T_2}{\partial \tau} dx. \quad (5)$$

В результате определяется продолжительность τ_{ξ_1} стадии предзамораживания как полином третьего порядка по отношению ξ_1

$$\begin{aligned} \tau_{\xi_1} = & \frac{\xi_1}{\alpha (T_{кр} - T_c)} \left[\varepsilon W \omega_1 \delta_1 + \frac{2n_2 c_2 \delta_2 (T_H - T_{кр})}{n_2 + 1} + \frac{c_1 \delta_1}{n_1 + 1} (T_{кр} - T_c) \right] + \\ & + \frac{\xi_1^2}{2n_1 \lambda_1 (T_{кр} - T_c)} \left[\varepsilon W \omega_1 \delta_1 + \frac{2n_2 c_2 \delta_2 (T_H - T_{кр})}{n_2 + 1} \left(1 - \frac{n_1 \lambda_1}{\alpha R}\right) + \frac{c_1 \delta_1}{n_1 + 1} (T_{кр} - T_c) \right] - \\ & - \frac{2n_2 c_2 \delta_2 (T_H - T_{кр})}{3n_1 \lambda_1 R (n_2 + 1) (T_{кр} - T_c)} \xi_1^3 - \frac{n_1 \lambda_1 c_1 \delta_1}{(n_1 + 1) \alpha^2} \operatorname{Ln} \left(1 + \frac{\alpha \xi_1}{n_1 \lambda_1}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

а время стадии последующего замораживания τ_2 будет равно (при $T_{н.к} = T_{кр}$):

$$\begin{aligned} \tau_2 = & \frac{(m-1) \xi_1}{\alpha (T_{кр} - T_c)} \left[\varepsilon W \omega_1 \delta_1 + \frac{2n_2 c_2 \delta_2}{n_2 + 1} (T_H - T_{кр}) + \frac{c_1 \delta_1}{n_1 + 1} (T_{кр} - T_c) \right] + \\ & + \frac{(m^2 - 1) \xi_1^2}{2n_1 \lambda_1 (T_{кр} - T_c)} \left[\varepsilon W \omega_1 \delta_1 + \frac{2n_2 c_2 \delta_2}{n_2 + 1} (T_H - T_{кр}) \left(1 - \frac{n_1 \lambda_1}{\alpha R}\right) + \frac{c_1 \delta_1}{n_1 + 1} (T_{кр} - T_c) \right] - \\ & - \frac{2n_2 c_2 \delta_2 (T_H - T_{кр})}{3n_1 \lambda_1 R (n_2 + 1) (T_{кр} - T_c)} (m^2 - 1) \xi_1^3 - \frac{n_1 \lambda_1 c_1 \delta_1}{(n_1 + 1) \alpha^2} \operatorname{Ln} \frac{n_1 \lambda_1 + m \alpha \xi_1}{n_1 \lambda_1 + \alpha \xi_1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $m = R/\xi_1$.

Если в полученной формуле для приближенных расчетов принято $n_1 = 1$ и $n_2 = 2$, можно получить формулу Шюва-Гейнца. А в действительности оба показателя степени n_1 и n_2 изменяются во времени.

Как следствие полученного решения, средний тепловой поток за время предзамораживания можно рассчитать

$$\bar{q}_1 = \frac{n_1 \lambda_1 f (T_{кр} - T_c)}{\xi_1} L_n \left(1 + \frac{\alpha \xi_1}{n_1 \lambda_1} \right), \text{ Вт/к}^2, \quad (8)$$

а для стадии последующего замораживания

$$\bar{q}_2 = \frac{n_2 \lambda_2 f (T_{кр} - T_c)}{R - \xi_2} L_n \frac{\alpha R + n_2 \lambda_2}{\alpha \xi_2 + n_2 \lambda_2}, \text{ Вт/к}^2. \quad (9)$$

Для инженерных расчетов замораживания стандартных полутов с предзамораживанием нами составлена универсальная диаграмма (рис. I), по которой можно одновременно определить 4 главных величины: время предзамораживания τ_{ξ_1} , удельный тепловой поток \bar{q}_1 , время последующего замораживания τ_2 (при $T_{ц.к} = T_{кр}$) и удельный тепловой поток \bar{q}_2 в зависимости от ξ_1 , α и T_c . Обозначение кривых на рис. I

α , ккал м ² .ч. ⁻¹ .°C	T_c , °C						
	20	24	28	30	35	40	
-20	№ 1	2	3	4	5	5	
-25	№ 7	8	9	10	11	12	
-30	№ 13	14	15	16	17	18	
-35	№ 19	20	21	22	23	24	

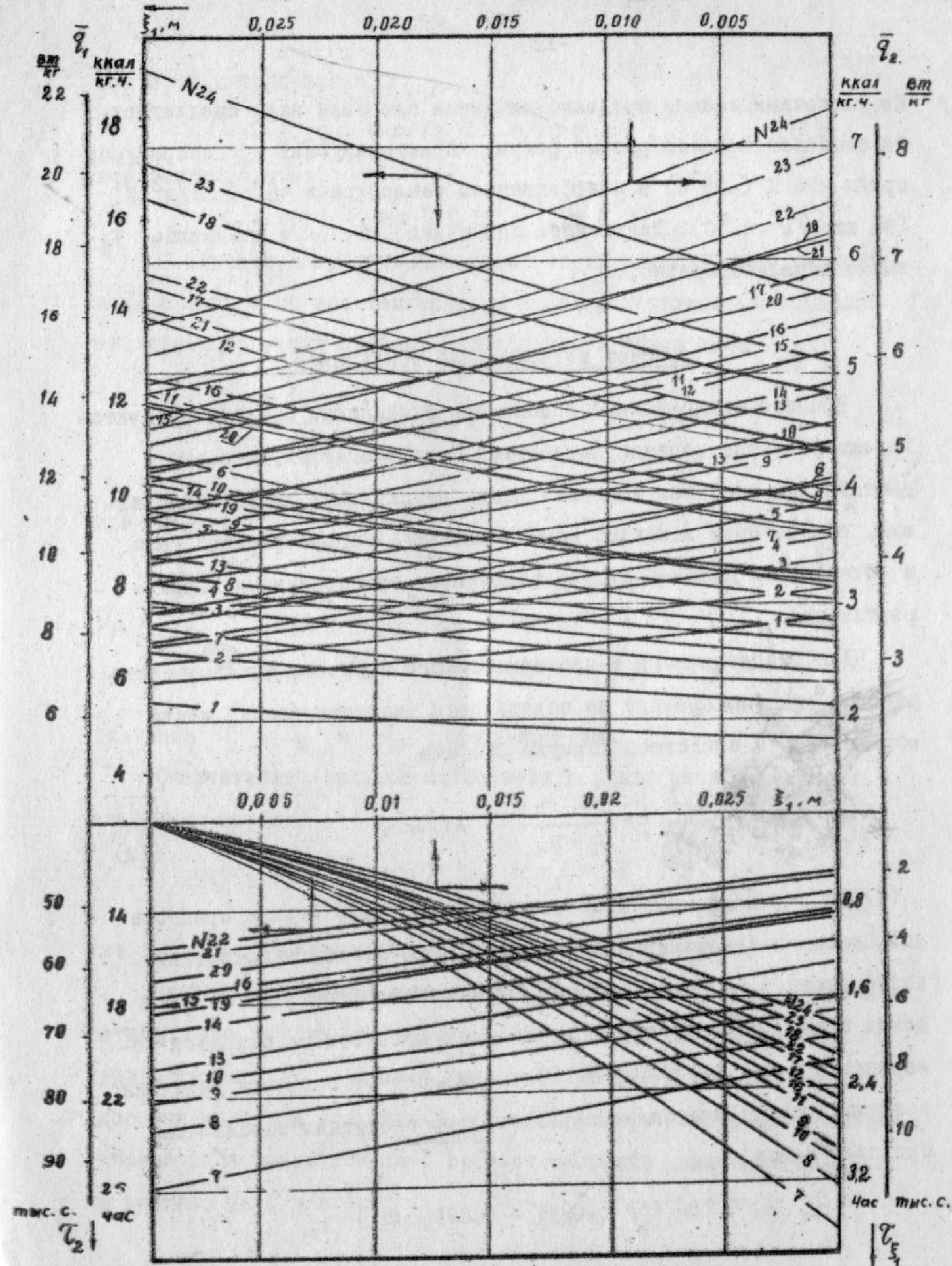


Рис. I. Номограмма для тепловых расчетов замораживания с приближенным предзамораживанием.

По расчетным данным предзамораживания пластины нами предлагается наиболее целесообразный режим, характеризующийся температурой среды 298 К (-35°C) и коэффициентом теплоотдачи 46,50 Вт/м².К (40 ккал/м².ч.°С). Дальнейшее повышение α или понижение T_c также нецелесообразно.

Расчет естественной убыли мяса

Процесс тепло-и массообмена при охлаждении пищевых продуктов характеризуется нестационарностью. Предполагается, что его с достаточной степенью точности можно описать как квазистационарный, при котором в каждый момент реальные характеристики тела и обтекающего потока воздуха заменяются стационарными характеристиками.

Для стационарного и изотермического процесса интенсивность массообмена (испарения) на поверхности жидкости (воды) можно определить по известной формуле Стефана

$$m_u = \frac{M_1 p_s D}{\delta_D RT} \ln \frac{p_s - p_c}{p_s - p_n} \quad , \quad \text{кг/м}^2 \cdot \text{ч.} \quad (10)$$

Для уточнения расчетов естественной убыли мяса в процессе охлаждения и замораживания в формулу (10) введем поправочный коэффициент $\bar{\epsilon}_v$, характеризующий отклонение процесса испарения воды с поверхности мяса от этого процесса на открытой поверхности воды. Коэффициент $\bar{\epsilon}_v$ зависит от скорости движения воздуха и определяется экспериментально следующим выражением при охлаждении:

$$\bar{\epsilon}_v = 0,70 - \exp(-0,51 - 0,875 \cdot v) \quad , \quad (11)$$

при предзамораживании

$$\bar{\epsilon}_v = 1,20 - \exp(1,9 - 0,70 v) \quad , \quad (12)$$

при замораживании

$$\bar{\epsilon}_v = 0,25 - \exp(-1,11 - 1,26 v) \quad . \quad (13)$$

С помощью аппроксимации зависимости парциального давления водяного пара от его температуры в соответствующих интервалах последней получили среднюю интенсивность убыли мяса

$$\bar{m}_u = \frac{k \bar{\epsilon}_v}{T_n - T_{n,k}} (J_1 + J_2 + J_2^*) \quad , \quad \text{кг/м}^2 \cdot \text{ч.} \quad (14)$$

где $k = 1,4 \cdot 10^{-5-0,2-0,8}$; $\bar{p}_c = p_c/p_s$; $\bar{p}_n^* = p_n^*/p_s$; $f(\tau) = (T+273)^{0,88} \ln \frac{1-\bar{p}_c}{1-\bar{p}_n^*}$;

$$J_1 = \int_{273}^{T_n+273} f(\tau) dT \quad ; \quad J_2 = \int_{T_{n,k}+273}^{273} f(\tau) dT \quad ; \quad J_2^* = \int_{T_{n,k}+273}^{T_n+273} f(\tau) dT$$

Значения J_1 , J_2 и J_2^* табулированы.

Окончательно среднюю естественную убыль мяса определяем следующим образом:

$$\Delta G\% = \frac{\bar{m}_u F \tau}{G \cdot 10^3} \cdot 100\% = 0,1 f \bar{m}_u \tau \quad , \quad \% \quad (15)$$

где f - удельная площадь поверхности мяса, м²/т.

Расчет показывает, что для уменьшения убыли мяса лучше сократить время стадии предзамораживания, при этом температура поверхности мяса T_n должна снижаться до 263 К при повышенной скорости движения воздуха (5 + 7 м/с), а при последующем замораживании желательно понижать среднюю скорость движения воздуха за процесс до 1 м/с.

Анализируя влияние различных факторов, воздействующих на продолжительность процесса и потерю мяса от усушки, и принимая во внимание тот факт, что температуру кипения аммиака в существующих охлаждающих системах нежелательно допускать ниже 228 К (-45°C), мы пришли к выводу, что для предзамораживания и замораживания в будущем температура воздуха тоже останется в интервале от 240 до 248 К (-33 + -25°C), а скорость его движения будет меняться от 5 до 7 м/с для предзамораживания, а для замораживания скорость движения воздуха должна быть переменной и изменяться от 4 м/с в начале до 0,5 м/с в конце процесса, в среднем она равна 1 + 1,5 м/с. Цикл замораживания при таких условиях будет продолжаться 18 + 22 часа, а естественная убыль - 0,98 + 1,30 % соответственно для свиных и говяжьих полутуш.

Экспериментальные исследования

Экспериментально определялись основные параметры, определяющие ход процесса предзамораживания, такие, как коэффициент теплоотдачи α , коэффициент массопереноса k_D , интенсивность испарения воды с поверхности продукта \dot{m}_w и относительная потеря массы от усушки $\Delta G\%$. Кроме того, продолжительность процессов предзамораживания τ_1 и последующего замораживания τ_2 с целью проверки достоверности полученных формул.

Лабораторные испытания по предзамораживанию проводились на образцах из пластины агарового студня.

Для экспериментов использовался холодильный шкаф "Нема", оборудованный трехступенчатой холодильной установкой, что позволило изменять температуру воздуха в пределах от 253 до 223 К (-20 + -50°C). В холодильной камере дополнительно устанавливались

устройства для экранирования образцов и создания направленной вынужденной циркуляции воздуха.

Термо-ЭДС определялась с помощью медь-константановых термопар. Термопары, предназначенные для измерения температуры в глубине образца, заделывались в термошупе. Первая по ходу термопара установлена в глубине 0,001 м от поверхности, а последняя - в центре образца (на оси симметрии пластины).

Термо-ЭДС определялась компенсационным методом с помощью потенциометра Р-306 и гальванометра М-17/4.

Тепловой поток измерялся малогабаритным тепломером, изготовленным и тарированным в лаборатории кафедры ТОТ КТИП.

Скорость движения воздуха определялась техническим крыльчатным анемометром, расположенным у края пластины внизу по ходу воздуха.

Циркуляция воздуха в камере создавалась вентилятором мощностью 80 Вт.

Исследуемый образец изготовлен из агарового студня с составом 3% сухого агар-агара и 1,5% поваренной соли.

Форма предусматривает создание образцов свободных для доступа воздуха с двух сторон самых больших плоскостей.

Для создания условий, которые имитировали бы неограниченность ограниченной пластины, образец был хорошо теплоизолирован с термов стиропором толщиной 0,06 м.

В опытах принят формальный закон теплообмена Ньютона на поверхности. Поэтому коэффициент теплоотдачи α определялся по тепловому потоку на поверхности $q_n(\tau)$.

$$q_n(\tau) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} \quad (16)$$

Температурный градиент $\frac{\partial T}{\partial x}$ на поверхности рассчитывался по формуле

$$\frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = \frac{-3T_n + 4T_{F_1} - T_{F_2}}{2(F_2 - F_1)}, \quad (17)$$

причем, $F_2 > F_1$.

Для проверки расчетных значений $q_n(\tau)$ нами экспериментально определялся тепловой поток тепломером

$$q_{опитн.} = k E(\tau)$$

где k — постоянная тепломера, равная $74 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{мВ}$.

По показаниям тепломера определяли явный тепловой поток q_p .

Для учета нестационарности процесса влагообмена на поверхности мяса критерий Nu_D рассчитывали по средней температуре пограничного слоя воздуха у поверхности.

Показатели степени парабол порядка n_1 и n_2 определялись по данным опыта

$$n_1 = \frac{T_n - T_c}{T_{кр} - T_n} \cdot \frac{\alpha \xi}{\lambda_1}; \quad n_2 = \frac{\log \theta_x}{\log \bar{x}}; \quad (18)$$

где $\bar{x} = \frac{R-x}{R-\xi}$; $\theta_x = \frac{T_x(\tau) - T_u(\tau)}{T_{кр} - T_u(\tau)}$.

Время τ_{ξ} , необходимое для образования замороженного слоя ξ , определялось графическим методом по температуре на разных глубинах образца в системе координат $T(x, \tau) - \tau$, вычитая время стадии предохлаждения.

Результаты экспериментального исследования
и их обсуждение

На основании экспериментов были рассчитаны критерии Nu_{α} и Nu_D , коэффициент массообмена k_D при различных значениях определяющего размера L и определяющей температуры T . Главным образом Nu_{α} и Nu_D рассчитаны по определяющему размеру, равному длине пути воздуха по поверхности образца ($L = l$), или равному квадратному корню из величины площади поверхности образца ($L = \sqrt{F}$), или равному толщине образца ($L = \delta$) (см. табл. I).

Таблица I

№ п/п	Формула	Определяющая температура, °С	Интервал изменения числа Re	Примечание
1.	$Nu_{\alpha} = 0,0375 Re_{\delta}^{0,795}$	T_c	$(1+2) \cdot 10^4$	δ — толщина образца
2.	$Nu_{\alpha} = 0,020 Re_{\sqrt{F}}^{0,87}$	T_c	$(4+11) \cdot 10^4$	F — площадь поверхности образца
3.	$Nu_D = 0,0745 \theta^{2/3} R_D^{1/3} Re_l^{0,64} = 0,0488 Re_l^{0,64}$	\bar{T}_n	$(1,8+8) \cdot 10^4$	l — длина пути движения воздуха
4.	$Nu_D = 0,065 \theta^{2/3} R_D^{1/3} Re_{\sqrt{F}}^{0,64} = 0,0424 Re_{\sqrt{F}}^{0,64}$	\bar{T}_n	$(1,8+7) \cdot 10^4$	
5.	$k_D = 0,0808 \theta^2 D_m R_D^{1/3} \left(\frac{v}{\nu}\right)^{0,682} = 0,0527 \cdot D_m \left(\frac{v}{\nu}\right)^{0,682}$	\bar{T}_n	$v = 1,7+7,2 \text{ м/с}$	

Одесский технологический институт пищевой промышленности им. М.П. Коцюбинского

БИБЛИОТЕКА

в.о. 14460

Для того, чтобы учесть влияние нестационарности процесса на результаты, рассчитанные по имеющимся в литературе формулам для стационарного режима, полученные результаты следовало увеличить на 25 %.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по Nu_{α} , Nu_D и h_D настоящего исследования с данными различных авторов представлено на рис. 2 и 3.

В расчетах Nu_D и h_D , согласно данным Чумака И.Г., введен коэффициент сопротивления корочки подсыхания (0,27) при замораживании мяса.

Все теплофизические коэффициенты агарового студня рассчитаны приближенно по правилу аддитивности бинарной смеси.

Как известно, температурные распределения в теле зависят от ряда факторов: теплофизических свойств продукта, интенсивности теплообмена и т.д. В интервале рассматриваемого режима теплообмена показатель степени n_1 принимает значения от 1 до 1,5 при $\xi = \frac{x}{R} < 1$, после этого (при $T_{ц.к} = T_{кр}$) n_1 уменьшается с ростом относительной температуры поверхности. В начальный период кривая $T_1(x, \tau)$ —прямая, потом постепенно искривляется (т.е. $n_1 > 1$), а при $T_{ц} < -5^{\circ}C$ имеет место линейная зависимость (т.е. $n_1 \rightarrow 1$).

В большинстве опытов показатель степени n_2 находится в интервале от 1,75 до 2,10. В расчетных формулах показатель участвует в виде комплекса $\frac{2n_2}{(n_2 + 1)}$, который изменяется от 1,29 до 1,89 при n_2 от 1,80 до 2,10. Поэтому в расчетах можно принять n_2 близкий к 2. Это не вызывает большой погрешности, даже при $n_2 = 2,5$ (при этом $\frac{2n_2}{(n_2 + 1)} = 1,49$).

В расчете предзамораживания предлагается принять $n_2 = 2,5$, а при последующем замораживании — $n_2 = 2$.

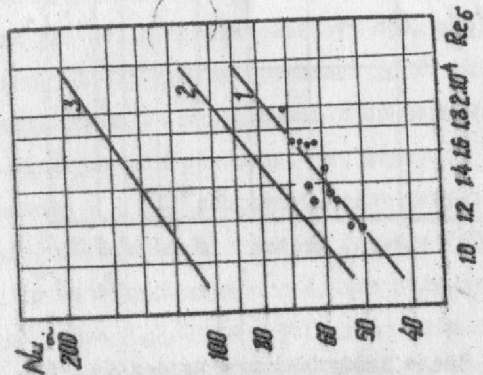
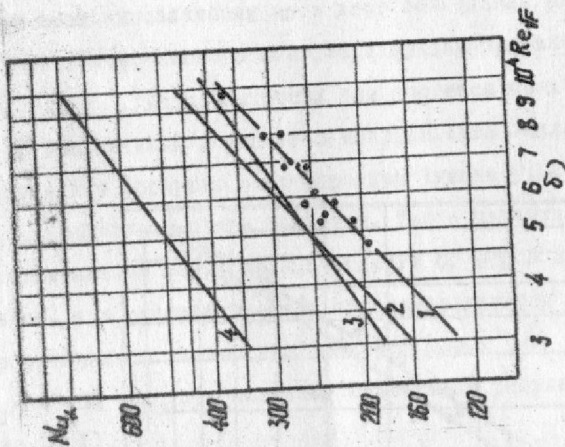


Рис. 2 Коэффициент теплоотдачи (число Nu_{α}) в процессе предзамораживания (данной работы): 1 — $Nu_{\alpha} = 0,028 Re^{0,795}$; 2 — $Nu_{\alpha} = 0,0375 Re^{0,795}$; 2-а — при $L = \delta$; 3 — $Nu_{\alpha} = 0,17 Re^{0,57}$; 4 — $Nu_{\alpha} = 0,25 Re^{0,70}$ (Чумаков И.Г., Московченко В.М.); 1 — $Nu_{\alpha} = 0,016 Re^{0,57}$; 2 — $Nu_{\alpha} = 0,020 Re^{0,87}$ (данной работы); 3 — $Nu_{\alpha} = 0,28 Re^{0,63}$ (Саву А.); 4 — $Nu_{\alpha} = 0,25 Re^{0,70}$ (Чумаков И.Г., Московченко В.М.).

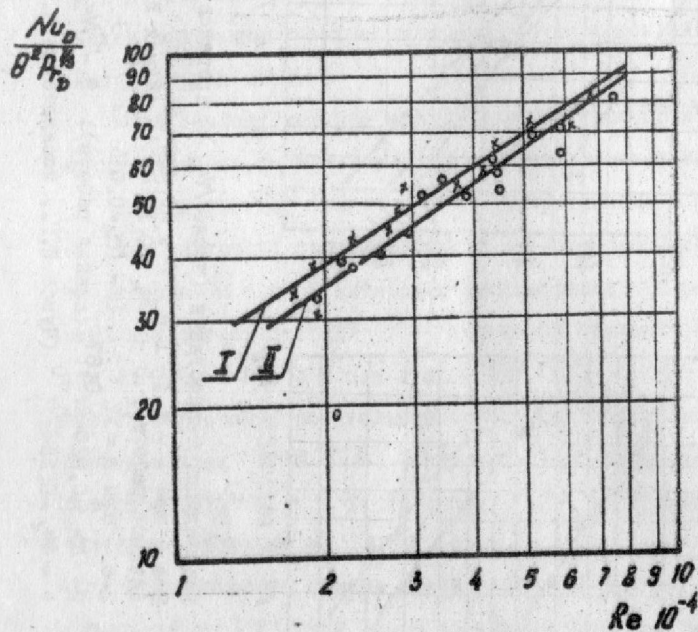


Рис. 3. Число диффузионного Нуссельта Nu_D :

I - $Nu_D = 0,0745 \theta^2 R_D^{1/3} Re^{0,64}$;

II - $Nu_D = 0,0650 \theta^2 R_D^{1/3} Re^{0,64}$.

На основании полученных в работе экспериментальных данных и сопоставления их с результатами других авторов приходим к следующим выводам :

1. Расчет коэффициента теплоотдачи по формуле Саву А. для условий предзамораживания мяса дает заниженный результат. Это объясняется тем, что его формула получена при низких значениях числа Re , не характерных для процесса предзамораживания .

2. Расхождения в расчетах коэффициента теплоотдачи α , по полученным формулам и по формулам Чумака И.Г. и Москоченко В.М., оказались очень большими. Такое расхождение можно объяснить отклонением формы мясных полутуш от формы пластины и, действительно, при расчете времени предзамораживания и последующего замораживания, с учетом коэффициента формы $k = 1,34$ (т.е. $\tau_{полут.} = 0,56 \tau_{пласт.}$), получены одинаковые результаты (расхождение до 10 %).

3. Опытные данные подтверждают приемлемость полученной формулы (6) для расчета продолжительности предзамораживания. Погрешность в отдельных случаях не превышает 25 %. Были приведены примерные расчеты процесса замораживания по формулам разных авторов.

Полученные расчеты показали, что формулы Ритова Д.Г., Планка Р. и Вейника А.И., с поправкой, дали результаты очень близкие друг к другу. А полученная в работе формула (6) дает приемлемый результат, почти совпадающий с тем, что получено по формуле Вейника А.И. и Ошкова П.П.-Гейнца Р.Г. и на 19 % больше в сравнении с результатом, полученным по формуле Планка Р.

При расчете по формуле (6), для удобства сопоставления, было принято $n_1 = 1,30$ для всех стадий замораживания. Это не отвечает конкретной картине процессов замораживания с применением предза -

морозивания. Правильнее было бы рассчитать отдельно каждую стадию с разными значениями n_1 и n_2 (как это сделано при составлении графика I) и с учетом коэффициента формы. Формула Рютова Д.Г., полученная полуэмпирически, предназначена для расчетов мясных отрубов, без учета коэффициента формы.

Рекомендации

Существующей организации подачи мяса с ЦПП в камеры холодильной обработки присущи недостатки: циклическая загрузка создает пиковые заполнения камеры и, следовательно, пиковые тепловые нагрузки камер охлаждения и замораживания совпадают или очень близки друг к другу, поэтому требуется дополнительная поверхность приборов охлаждения и производительность холодильных машин. Это усложняет рациональную организацию эксплуатации холодильных машин и требует установления лишних компрессоров, коэффициент рабочего времени которых очень мал ($\frac{1}{6} + \frac{1}{4}$).

Организация подачи мяса в камеры термообработки считается лучшей, если она обеспечивает: сокращение емкости камеры до возможного минимума; несовпадение пиковых тепловых нагрузок на холодильные машины.

Автором, совместно с Шахневичем В.И., предложены три варианта подачи мяса с ЦПП в камеры охлаждения и замораживания:

I вариант - (при постоянной производительности ЦПП и камер термообработки). Главный поток мяса с ЦПП поступит в камеры предзамораживания и замораживания только после того, как будут заполнены мясом камеры охлаждения. Когда начинается выгрузка охлажденного мяса, парное мясо опять загружается в камеры охлаждения так, чтобы они оставались полными до конца рабочего дня. Тогда емкость камеры

охлаждения обновляется n^* раз, причем n^* зависит от цикла охлаждения. Пиковые тепловые нагрузки частично складываются. Загруженность камер периодически изменяется.

II вариант - (при изменениях в производительности ЦПП и отности в тельном количестве P мяса, идущего на охлаждение и замораживание, $P_i = 0+1$). Для этого случая в начале рабочего i -ого дня ($T_{загр. i}^{охл.}$) мясо с количеством $2P_i G_i(\tau)$ поступит только в камеры охлаждения, а в остальное рабочее время суток ($T_{загр. i}^{зам.} - (16 - A_2) - T_{загр. i}^{охл.}$) мясо поступит в камеры предзамораживания и затем в камеры замораживания в количестве $2(1-P_i)G_i(\tau)$. Изменение загруженности камер холодильной обработки изо дня в день имеет качественно подобный ход, но количественно не повторяется, т.е. изменяется аperiodически и зависит от цикла и режима, которые приняты в предыдущий день. Для камер замораживания, при соблюдении условия

$$T_{зам. i} < 24 + (P_{i+1} - P_i)(16 - A_2) + T_{i, i+1} - T_{i, i} \quad (19)$$

потребная емкость камер будет не больше величины $\max\{2(1-P_i)G_i\}$ и пиковые загруженности камер не совпадают. Если условия (19) не соблюдаются, емкость камер замораживания должна быть принята, исходя из условия $\max\{4(1-P_i)G_i\}$, и тепловая нагрузка камер охлаждения и камер замораживания изменяется почти синхронно.

III вариант - для случая, когда продолжительность цикла замораживания более суток, напр. мер до 40 часов. Подачу мяса в камеры необходимо осуществлять со сдвигом во времени на 24 часа: поочередно все мясо в одни сутки поступает в камеры охлаждения, а в следующие сутки идет только на замораживание.

Расчет тепловой нагрузки на холодильные машины

Известно, в каждый момент времени в процессе замораживания интенсивность теплового потока от полутуш к воздуху различная и зависит от времени нахождения последних в камере. Точно рассчитать динамику суммарного теплового потока от всех полутуш, находящихся в камере в данный момент времени, очень трудно. Предлагается методика приближенного расчета теплового потока в характерные моменты времени, когда резко изменяется загруженность камеры (см. точки Б, В, Г, Д на рис. 4). С помощью полученных результатов теоретического решения и метода осреднения скорости образования замороженного слоя мяса получены тепловые потоки от мяса к воздуху в узловые моменты времени.

$$Q_M^B = \frac{12,5 E_{max}(T_{кр}T_c)}{T_{\Sigma}} \left\{ \frac{R\Phi_1}{\alpha_1 \mu_1^2} [1 - \exp(-R\tau)] + \frac{\Delta_{min} - T_3}{R - \xi_5} \ln \left(1 + \frac{R - \xi_5}{\xi_5 + \frac{\lambda_1}{\alpha}} \right) \right\}, \text{ кВт,}$$

$$Q_M^B = \frac{12,5 E_{max} \Delta_{min} (T_{кр}T_c)}{T_{\Sigma} (\xi_2 - \xi_1)} \ln \left(1 + \frac{\xi_2 - \xi_1}{\xi_1 + \frac{\lambda_1}{\alpha}} \right), \text{ кВт,}$$

$$Q_M^Г = \frac{12,5 E_{max} (\Delta_n + \Delta_{min}) (T_{кр}T_c)}{T_{\Sigma} (\xi_3 - \xi_1)} \ln \left(1 + \frac{\xi_3 - \xi_1}{\xi_1 + \frac{\lambda_1}{\alpha}} \right), \text{ кВт,}$$

$$Q_M^Д = \frac{12,5 E_{max} (T_{кр}T_c)}{T_{\Sigma}} \left\{ \frac{R\Phi_1}{\alpha_1 \mu_1^2} [1 - \exp(-R\tau)] + \frac{\Delta_{min} + \Delta_n - T_3}{R - \xi_4} \ln \left(1 + \frac{R - \xi_4}{\xi_4 + \frac{\lambda_1}{\alpha}} \right) \right\}, \text{ кВт,}$$

где E_{max} — емкость камеры, т ; $R\tau = \mu_1^2 F_0 \tau$;
 $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5$ — толщина замороженного слоя мяса, образованного соответственно за время предзамораживания и за интервал времени, равный $\Delta_{min}, \Delta_{min} + \Delta_n, \Delta_{max}, \Delta_{max} + \Delta_n$.

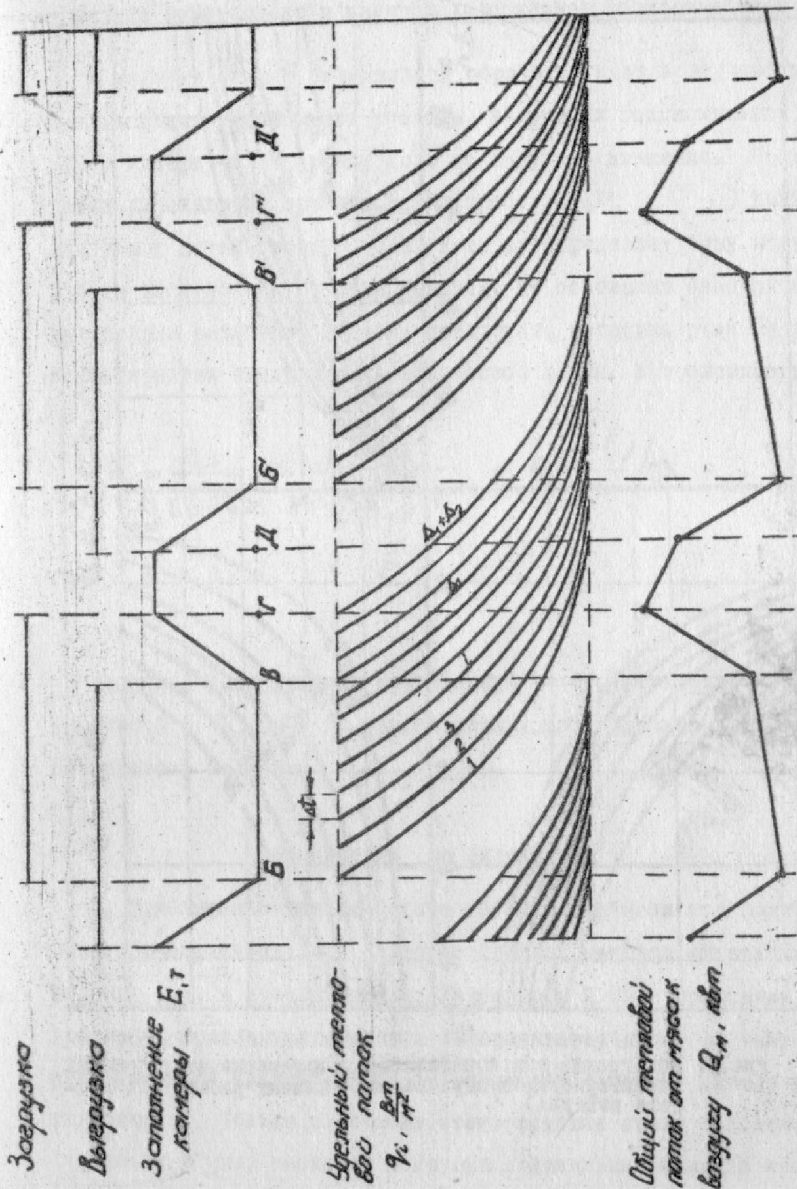


Рис. 4. Схема для расчета теплового потока от мяса к воздуху в камере нерегулярного замораживания.

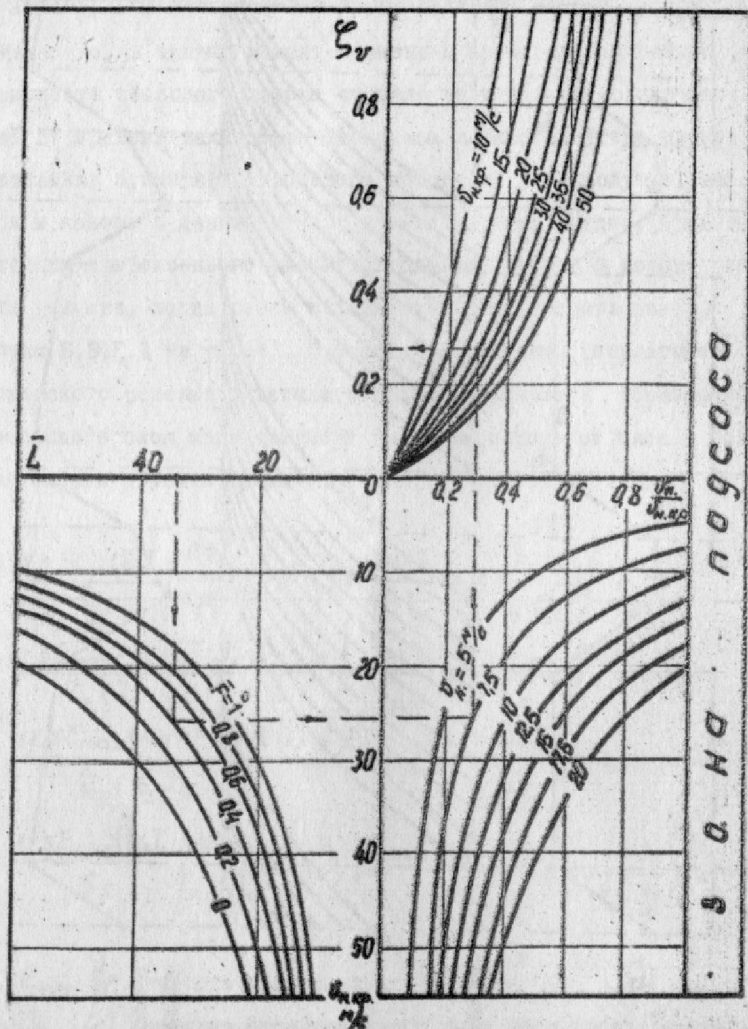


Рис. 5. Номограмма для определения конструктивных и рабочих характеристик воздухопроводов (условия работы без подсоса воздуха)

Расчет воздуховода в камерах холодильной обработки мяса

В условиях камер холодильной обработки мяса воздуховоды современных конструкций имеют участки, в которых подсасывается воздух с камеры через первые щели по ходу его движения. Предложен метод определения критической скорости ($v_{н.кр}$) движения воздуха в начале воздуховода, которая определяет зону нормальной работы воздуховода от зоны подсоса. На основании экспериментальных данных различных авторов предложена методика расчета рабочих характеристик воздухопроводов конической формы, в зависимости от v_n

$$\epsilon_v = \frac{v_{н.с}}{v_{н.с}} = 16.10 \left[\frac{1}{\frac{1200}{L(1+\bar{F})} - v_n} - \frac{\bar{L}(1+\bar{F})}{1200} \right], \quad (20)$$

где $\bar{L} = L/d_n$; $\bar{F} = F_k/F_n$.

На рис.5 даны графики для расчета конструктивных (\bar{L} , \bar{F}) и рабочих (ϵ_v , v_n) характеристик воздухопроводов, работающих без подсоса воздуха.

Заключение и выводы

I. Приближенно решена задача теплопроводности при наличии фазового превращения воды с использованием методов аппроксимации Вейника А.И. и преобразования Лейбензона Л.С. и применена для процессов предзамораживания и замораживания мяса. Из полученного решения можно получить формулы различных авторов, дающие большую погрешность. Только на основе этого решения стало возможным рассчитать динамику тепловой нагрузки холодильных машин в процессе поточного (непрерывного) замораживания мяса.

Рекомендованы аналитические зависимости и номограммы для инженерных тепловых и технологических расчетов камер термообработки и оборудования для них.

2. Получены экспериментальным путем формулы для определения безразмерного коэффициента теплоотдачи $Nu_{\text{ст}}$ и массообмена Nu_D в процессе предзамораживания. Кроме того, принимая квази-стационарный режим для расчета весовых потерь мяса при замораживании и сочетая аналитические данные с экспериментальными, получили полуэмпирическую формулу (14), правильность которой проверена сопоставлением экспериментальных данных других авторов с расчетными.

3. Как развитие метода однофазного замораживания предложена новая технологическая стадия - предзамораживание мяса, что позволяет интенсифицировать процесс замораживания и сократить весовые потери мяса на 30-40 % в сравнении с нормами (0,9+1,3 % против 1,60+1,96 %, как это предусматривается по нормам однофазного замораживания при циклической загрузке для свиных и говяжьих полутуш соответственно). С учетом практической возможности холодильной промышленности рекомендуются режимные параметры для процесса предзамораживания $T_c = 240 - 248 \text{ K}$, $v = 5 + 7 \text{ м/с}$ и для замораживания $T_c = 240 - 248 \text{ K}$, $v = 4 \rightarrow 0,5 \text{ м/с}$, v_{air} .

4. Разработан рациональный метод подачи мяса в камеры охлаждения и замораживания с фазовым запаздыванием для уменьшения емкости камер и во избежание совпадений их пиковых тепловых нагрузок. Получены формулы для расчета загруженности камер в любой момент времени при поступлении мяса в них с любым запаздыванием. Емкость камер термообработки определяется по их производительности.

5. Предложена впервые методика расчета динамики теплового потока от мяса к воздуху в камерах поточного замораживания, что позволит определить изменение тепловой нагрузки на компрессоры, обслуживающие эти камеры. Определенная при этом динамика тепловой нагрузки является основанием для выбора приборов автоматизации и для рационального создания компаунд-схемы холодильных машин, позволяющей использовать резервы холодопроизводительности установленных компрессоров и сократить число вспомогательных аппаратов и оборудования.

6. Предложена также впервые методика расчета воздухораспределителей в камерах поточного замораживания с заданным законом изменения скорости движения воздуха у бедренной части полутуши.

7. Переход к новой технологии замораживания не требует дорогостоящих машин и существенных изменений в охлаждающей системе или конструкции существующих холодильников. Она хорошо вписывается в современные требования организации автоматизированного и поточного производства.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- α - коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 $\delta = 2R$ - толщина наиболее толстой части бедра мясной полутуши, м ;
 δ_D - толщина диффузионного пограничного слоя, м ;
 c - теплоемкость, Дж/кг.К ;
 d - диаметр, м ;
 D - коэффициент диффузии водяного пара в воздухе, $\text{м}^2/\text{с}$;
 f - удельная площадь поверхности (продукта, выпускных отверстий), $\text{м}^2/\text{т}$, $\text{м}^2/\text{пог.м}$;
 F - площадь поверхности, м^2 ;
 G - масса, кг ;
 k_D - коэффициент массообмена, м/с ;
 l - энтальпия, Дж/кг ;
 m, j_m - удельный массовый поток, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$;
 k - коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$) или коэффициент запаса (в долях единицы) ;
 L - определяющий размер, м ;
 p - давление (парциальное или суммарное), Па (мм.рт.ст.) ;
 Δp - перепад гидравлического напора, Па ;
 q - удельный тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$, $\frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$;
 Q - суммарный тепловой поток, кВт ;
 z - скрытая теплота льдообразования, Дж/кг ;
 R - универсальная газовая постоянная или половина толщины продукта (м) ;
 T - температура, К ($^{\circ}\text{C}$) ;
 τ - время, с (час) ;
 v - скорость движения (воздуха или конвейера...), м/с ;
 V - объем или расход воздуха, м^3 ; $\text{м}^3/\text{с}$;
 p_i - относительное количество мяса идущего на охлаждение, $p_i = 0 + 1$;

- w - относительное количество вымороженной воды, в долях единицы ;
 W - относительное влагосодержание продукта, в долях единицы ;
 x - текущая координата, м ;
 y - удельный вес, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 α - коэффициент теплоотдачи от мяса к воздуху, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$;
 θ - относительная температура, в долях единицы ;
 μ - корень характеристических уравнений ;
 μ - динамическая вязкость, $\text{кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$;
 ν - кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;
 φ - относительная влажность воздуха, в долях единицы ;
 δ - толщина замороженного слоя, м ;
 $\lambda_{тр}$ - коэффициент сопротивления трению ;
 λ - коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$;
 Bi - критерий Био ;
 Fo - критерий Фурье ;
 Nu_{α} - тепловой критерий Нуссельта ;
 Nu_D - диффузионный критерий Нуссельта ;
 Re - критерий Рейнольдса ;
 Sc - тепловой критерий Шмидта .

Основные индексы

- п - параметр поверхности или пара ;
- ц - параметр в центре тела ;
- н - начальный параметр ;
- к - конечный параметр ;
- кр - криоскопический или критический ;
- с - относящийся к среде ;
- Д - относящийся к процессам диффузии ;
- м - параметр мяса ;
- б - относящийся к бедренной зоне или к толщине бедра полутуши или барометрический параметр ;
- о - относящийся к параметрам на выходе выпускных отверстий ;
- воз. - относящийся к воздуху ;
- зам., охл., предз., предохл. - соответственно относящиеся к процессам замораживания, охлаждения, предзамораживания или предохлаждения ;
- 1 - относящийся к замороженной зоне } при теплофизических коэффициентах
- 2 - относящийся к немороженной зоне }

ПУБЛИКАЦИИ ПО РАБОТЕ

1. Чумаков И.Г., Фам Ван Бон. Методика теплового расчета камер поточного замораживания. ЦНИИТЭИ, 1975.
2. Чумаков И.Г., Фам Ван Бон, Шахневич В.И. Методика расчета воздухопроводов в камерах холодильной обработки мяса. И. "Холодильная техника" (принята к печати).
3. Чумаков И.Г., Исаев В.И., Шахневич В.И., Фам Ван Бон. Поточный метод холодильной обработки мяса на производственных холодильниках. Доклад на конференции МИХ, Москва, 1975 (принят).
4. Чумаков И.Г., Шахневич В.И., Фам Ван Бон, Васильева Л.К. Новые технологии охлаждения и замораживания мяса. ЦНИИТЭИ, 1975.