

М 396438

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище  
имени Н.Э.Баумана

НА ДОМ  
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

АГАФОНОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В АППАРАТАХ ИНТЕНСИВНОГО  
ОХЛАЖДЕНИЯ КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА

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

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

Москва 1982

Работа выполнена в Московском институте народного хозяйства  
имени Г.В.Плеханова

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор ЧИСТЯКОВ Ф.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор ЛЕБЕДЕВ В.Ф.

кандидат технических наук  
МАКАРОВ Б.А.

Ведущее предприятие: ВНИИТИХолодпром

Защита диссертации состоится " 11 " октября " 1982 г.  
в 16 час. 30 мин.

на заседании специализированного Совета К.053.15.07. " Крío-  
генные, холодильные, гидравлические, вакуумные и компрессор-  
ные машины и аппараты" МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005;  
Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус факультета "Энергомаш-  
ностроения".

С диссертацией можно ознакомиться  
МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан

Ваши отзывы в двух  
просьба присылать по адре  
ул., дом 5, специализиро

Ученый секретарь  
специализированного  
кандидат технических  
доцент

М 306438

7  
МЗ06438

Актуальность темы. Для осуществления планов развития производства быстрозамороженных и охлажденных пищевых продуктов и полуфабрикатов, намеченных XXVI съездом КПСС в одиннадцатой пятилетке на 1981-1985 гг., необходимо широкое внедрение в пищевой промышленности и общественном питании технологии быстрого охлаждения и замораживания пищевых продуктов. Это требует проведения углубленных исследований и разработки высокопроизводительного технологического оборудования и, в частности, конвейерных аппаратов для интенсивного охлаждения мелкофасованных пищевых продуктов. При любом конструктивном оформлении охлаждающие аппараты должны обладать высокими технико-экономическими показателями, быть простыми и надежными в эксплуатации. Решение этих задач возможно лишь при обеспечении высокой эффективности процесса охлаждения. До настоящего времени вопросам охлаждения мелкофасованных пищевых продуктов в потоке воздуха уделялось недостаточное внимание. Существующие методы расчета не могут обеспечить требуемой точности расчетов процессов охлаждения в конвейерных аппаратах. Поэтому проведение исследований по изучению процессов теплообмена в таких аппаратах является актуальным.

Цель работы. Исследование динамики процесса теплообмена в аппаратах интенсивного охлаждения конвейерного типа, разработка надежного метода расчета конвейерных аппаратов с учетом изменения температуры воздуха во времени и определение направлений по интенсификации процесса охлаждения в этих аппаратах.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. Разработана математическая модель процесса охлаждения. При решении описывающих процесс дифференциальных уравнений использовался метод интегральных преобразований по Лапласу. Численные результаты получены с помощью ЭВМ. Экспериментальная часть работы выполнена на основе теории подобия с применением современной испытательной и измерительной аппаратуры.

Научная новизна. Выбрана и обоснована физическая и математическая модель скороохлаждающего аппарата, на основе которой исследован процесс теплообмена в подвижном слое пищевого продукта в форме прямоугольного параллелепипеда. Выявлен характер влияния независимых факторов на условия протекания процесса. Экспериментально подтверждена адекватность выбранной математической модели физическому процессу.

Результаты работы. Получены точное и приближенное решения за-

дачи об охлаждении слоя мелкофасованных продуктов в форме прямоугольного параллелепипеда в аппаратах интенсивного охлаждения конвейерного типа. На основе результатов теоретического исследования разработан алгоритм и составлена программа расчета квазистационарных температурных полей в скороохлаждающих аппаратах. Определены оптимальные с точки зрения интенсификации процесса пределы изменения независимых параметров, оказывающих влияние на протекание процесса. На основе результатов теоретического и экспериментального исследований разработана методика расчета аппаратов конвейерного типа.

Практическая ценность. Разработанный метод расчета и результаты численного эксперимента использованы при проектировании аппарата, предназначенного для охлаждения мелкофасованного маргарина.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники" (Ленинград, 1981 г.). Содержание диссертации обсуждалось на заседаниях научно-технического семинара и кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" МВТУ им.п.Э.Баумана, а также на заседании кафедры "Торговое и холодильное оборудование" МГХ им.Г.В.Плеханова.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано три печатных работы, получено одно авторское свидетельство.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 208 страницах машинописного текста, включает введение, 4 главы, выводы и Приложение, содержит 32 рисунка и 37 таблиц. Библиография включает 157 наименований работ.

В первой главе описаны конструкции отечественных и зарубежных скороморозильных аппаратов конвейерного типа.

Благодаря своей универсальности конвейерные аппараты с интенсивным движением воздуха получили наибольшее распространение по сравнению с аппаратами других типов. На основе анализа работ по теоретическому исследованию процессов охлаждения и замораживания пищевых продуктов в воздухе установлено, что оптимизация работы охлаждающих и морозильных аппаратов тесно связана с вопросом о продолжительности охлаждения и замораживания продукта. Длительность названных процессов является определяющим фактором, влияющим на габариты аппарата и его производительность, а, следовательно, и на его металлоемкость и энергопотребление.

Специфика процесса теплообмена в конвейерных аппаратах состоит в том, что внешние условия протекания процесса теплообмена характеризуются непостоянством температуры теплообдающей среды (воздуха) и коэффициента теплоотдачи на различных участках поверхности продукта. Например, в противоточных конвейерных аппаратах нагрев воздуха достигает  $10^{\circ}\text{C}$ . Существующие методы расчета процесса охлаждения пищевых продуктов в воздухе основываются или на предположении постоянства температуры охлаждающего воздуха, или, если процесс охлаждения протекает при переменной температуре воздуха, на предположении, что закон изменения его заранее известен. В конвейерных аппаратах, предназначенных для охлаждения мелкофасованных пищевых продуктов, предсказать закон изменения температуры воздуха во времени сложно, так как он зависит от совокупного действия целого ряда факторов, влияющих на процесс теплообмена.

Таким образом, применение известных решений задачи об охлаждении пищевых продуктов в потоке воздуха для расчета процесса теплообмена в конвейерных аппаратах проточного или противоточного типов не может обеспечить точности расчетов.

В связи с вышеизложенным были поставлены следующие задачи исследования:

1. Исследование процесса теплообмена в аппаратах конвейерного типа, предназначенных для охлаждения мелкофасованных пищевых продуктов.

2. Анализ влияния различных условий и параметров процесса на характер протекания процесса теплообмена при охлаждении пищевых продуктов в конвейерных аппаратах.

3. Экспериментальная проверка результатов и выводов аналитического исследования.

4. Разработка на основе полученного решения методики расчета, проведение ее апробации.

Вторая глава содержит результаты аналитического исследования процесса теплообмена в аппаратах интенсивного охлаждения конвейерного типа.

Для теоретического исследования была принята физическая модель теплообмена в подвижном слое массивных тел, приоритет в разработке которой принадлежит Г.П.Иванцову и В.А.Любову. На основе принятой физической модели процесс теплообмена описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

дифференциальное уравнение теплопроводности для прямо-  
угольного параллелепипеда

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \alpha_n \Delta T_n ; \quad T_n = T_n(t, \ell, x, y, z) \quad \dots (1)$$

уравнение теплового баланса (уравнение динамики)

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial T_b}{\partial t} \pm w_b \frac{\partial T_b}{\partial \ell} &= \sum_{j=1}^6 \frac{\alpha_j}{\rho_b c_b} \frac{F_j}{L} (T_b - \bar{T}_{n,j}^s), \\ T_b &= T_b(t, \ell) \quad \dots (2) \end{aligned}$$

При выборе математической модели были сделаны следующие допущения: 1) лучистой составляющей теплообмена ввиду малой разности температур в охлаждательном аппарате можно пренебречь; 2) в процессе теплообмена фазовые переходы в пищевом продукте отсутствуют; 3) температуры воздуха по сечению аппарата распределены равномерно; 4) отношение водяных эквивалентов потоков воздуха и пищевого продукта постоянно; 5) теплофизические свойства воздуха и продукта не зависят от температуры; 6) массой конвейера можно пренебречь.

Приведенная система уравнений (1-2) в сочетании с различными начальными и граничными условиями образует различные краевые задачи процесса охлаждения в скороохлаждающих аппаратах. В работе приводится постановка краевой задачи для нестационарного режима работы аппарата, на основе которой, введя допущение о симметричном характере распределения температуры в пачке продукта относительно координатных осей, проходящих через центр пачки, дана постановка краевой задачи для установившегося (квазистационарного) режима работы аппарата. В критериальной форме система уравнений имеет вид

$$\frac{\partial \Theta_n}{\partial \bar{t}} = F_{01} \frac{\partial^2 \Theta_n}{\partial \bar{x}^2} + F_{02} \frac{\partial^2 \Theta_n}{\partial \bar{y}^2} + F_{03} \frac{\partial^2 \Theta_n}{\partial \bar{z}^2} \quad \dots (3)$$

$$\pm \frac{d\Theta_b}{d\bar{t}} = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{\bar{W}} F_{0j} Bi_j (\Theta_b - \bar{\Theta}_{n,j}^s) \quad \dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} + \frac{\partial \Theta_n}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=\pm 1} + Bi_1 (\Theta_B - \Theta_n) \Big|_{\bar{x}=\pm 1} &= 0 \\ + \frac{\partial \Theta_n}{\partial \bar{y}} \Big|_{\bar{y}=\pm 1} + Bi_2 (\Theta_B - \Theta_n) \Big|_{\bar{y}=\pm 1} &= 0 \\ + \frac{\partial \Theta_n}{\partial \bar{z}} \Big|_{\bar{z}=\pm 1} + Bi_3 (\Theta_B - \Theta_n) \Big|_{\bar{z}=\pm 1} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

$$\frac{\partial \Theta_n}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = 0; \quad \frac{\partial \Theta_n}{\partial \bar{y}} \Big|_{\bar{y}=0} = 0; \quad \frac{\partial \Theta_n}{\partial \bar{z}} \Big|_{\bar{z}=0} = 0; \quad \dots (6)$$

$$\Theta_n(0, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0; \quad \Theta_B(0) = 1. \quad \dots (7)$$

Для решения системы уравнений (3-4) с краевыми условиями (5-7) была использована теорема Дюамеля, согласно которой температура продукта может быть вычислена по уравнению

$$\begin{aligned} \Theta_n &= \Theta_B(0) U_n(\bar{\ell}, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) + \\ &+ \int_0^{\bar{\ell}} \frac{d\Theta_B}{d\bar{\ell}} \Big|_{\bar{\ell}=\bar{\ell}-p} U_n(p, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) dp, \end{aligned} \quad \dots (8)$$

где

$$U_n(\bar{\ell}, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} E_i \exp(-G_i \bar{\ell}); \quad \dots (9)$$

$$A_{i,j} = 2 \sin \mu_{i,j} / (\mu_{i,j} + \sin \mu_{i,j} \cos \mu_{i,j}); \quad \operatorname{ctg} \mu_{i,j} = \frac{\mu_{i,j}}{Bi_j};$$

$$E_i = A_{i,1} A_{i,2} A_{i,3} \cos \mu_{i,1} \bar{x} \cos \mu_{i,2} \bar{y} \cos \mu_{i,3} \bar{z};$$

$$G_i = (\mu_{i,1}^2 / R_1^2 + \mu_{i,2}^2 / R_2^2 + \mu_{i,3}^2 / R_3^2) a_n \tau_{\text{пк}}.$$

Уравнение (9) описывает распределение температуры в прямоугольном параллелепипеде при граничных условиях третьего рода. Применяя к уравнениям (4), (8), (9) интегральное преобразование Лапласа относительно переменной  $\bar{\ell}$ , после соответствующих преобразований было получено для искомых функций решение

$$\Theta_{L_B} = \frac{\Theta_B(0)}{s + \sum_{i=1}^{\infty} J_i s / (s + G_i)} ; \quad \dots (I0)$$

$$\Theta_{L_n} = \Theta_{L_B} - \Theta_B(0) \frac{\sum_{i=1}^{\infty} E_i s / (s + G_i)}{s + \sum_{i=1}^{\infty} J_i s / (s + G_i)} , \quad \dots (II)$$

где

$$J_i = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^3 F_{0j} B_{ij} C_{i,j} ; C_{i,j} = \frac{A_{i,j} \cos \mu_{i,j} K_{i,1} K_{i,2} K_{i,3}}{K_{i,j}} ;$$

$$K_{i,j} = A_{i,j} \sin \mu_{i,j} / \mu_{i,j} , (j=1,2,3) .$$

Переход к оригиналам осуществлен по теореме разложения.

Решение задачи имеет вид :

$$\Theta_B = \sum_{k=1}^j \frac{\Theta_B(0)}{\varphi'(s_k)} \exp(s_k \bar{t}) + \\ + \sum_{k=j+1}^k \frac{1}{(z_k - 1)!} \lim_{s \rightarrow s_k} \left[ \frac{d^{z_k-1}}{ds^{z_k-1}} \left( \frac{\Theta_B(0)(s-s_k)^{z_k}}{\varphi(s)} \exp(s \bar{t}) \right) \right] \dots (I2)$$

$$\Theta_n = \Theta_B - \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \sum_{k=1}^j \frac{\Theta_B(0) E_i s_k}{\varphi'_i(s_k)} \exp(s_k \bar{t}) + \right. \\ \left. + \sum_{k=j+1}^k \frac{1}{(z_k - 1)!} \lim_{s \rightarrow s_k} \left[ \frac{d^{z_k-1}}{ds^{z_k-1}} \left( \frac{\Theta_B(0) E_i (s-s_k)^{z_k}}{\varphi_i(s)} \exp(s \bar{t}) \right) \right] \right\} \dots (I3)$$

где  $\varphi'(s_k)$  и  $\varphi'_i(s_k)$  - производные функций

$$\varphi(s) = s + (D_1 s + D_2 s^2 + D_3 s^3 + \dots + D_k s^k), (k \rightarrow \infty) \text{ и}$$

$\varphi_i(s) = \varphi(s)(s + G_i)$  , а  $s_k$  - корни уравнения  $\varphi(s_k) = 0$ .  
Значения коэффициентов  $D_k$  определяются из

$$D_k = (-1)^{k+1} (J_1/G_1^k + J_2/G_2^k + J_3/G_3^k + \dots + J_i/G_i^k) .$$

Средняя по объему температура пачки продукта находится по формуле, аналогичной формуле (13), при этом вместо коэффициентов  $E_i$  подставляются коэффициенты

$$M_i = \sum_{j=1}^3 K_{i,j}$$

Для случая больших значений числа Фурье ( $Fo \gg 1$ ) получено приближенное решение задачи

$$\bar{\theta}_s = \frac{\bar{W}}{\bar{W} + 1} + \frac{1}{\bar{W} + 1} \exp \left[ - \left( \frac{\bar{W} + 1}{\bar{W}} \right) \psi_1 Fo_n \bar{\ell} \right]; \quad \dots (14)$$

$$\bar{\theta}_n = \bar{\theta}_s - E_1 \exp \left[ - \left( \frac{\bar{W} + 1}{\bar{W}} \right) \psi_1 Fo_n \bar{\ell} \right]; \quad \dots (15)$$

$$\bar{\theta}_n^v = \bar{\theta}_s - \exp \left[ - \left( \frac{\bar{W} + 1}{\bar{W}} \right) \psi_1 Fo_n \bar{\ell} \right], \quad \dots (16)$$

где  $\psi_1 = \sum_{j=1}^3 Bi_j \varepsilon_j^2$ ;  $\varepsilon_j = R/R_j$ ;  $1/R^2 = 1/R_1^2 + 1/R_2^2 + 1/R_3^2$ .

Для выявления влияния независимых параметров на распределение температурных полей в скороохлаждающем аппарате, а также на точность расчетов по приближенным формулам был проведен численный эксперимент. Как показал анализ полученного решения, независимыми параметрами, определяющими процесс теплообмена, являются - критерий  $Bi$ , критерий  $Fo_n$ , отношение водяных эквивалентов воздуха и пищевого продукта  $\bar{W}$ , относительные размеры пачки продукта  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , относительная координата положения пачки в аппарате  $\bar{\ell}$  и относительные координаты расчетной точки в продукте  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ , для которой вычисляется температура. В качестве объекта исследования для проведения численного эксперимента были выбраны пачки маргарина трех типоразмеров: тип А - 0,052x0,052x0,098 м, тип Б - 0,04x0,055x0,12 м, тип В - 0,042x0,051x0,098 м.

На основе анализа результатов реализованного на ЭВМ расчетного исследования установлено качественное и количественное влияние каждого параметра в реальном диапазоне его изменения на характер распределения температур в аппарате, а, следовательно, и на интенсивность протекания процесса теплообмена. На рис. I представлены графические зависимости скорости охлаждения  $d\bar{\theta}_n^v/dFo$  при поперечном и продольном обдуве пачек

типа А.

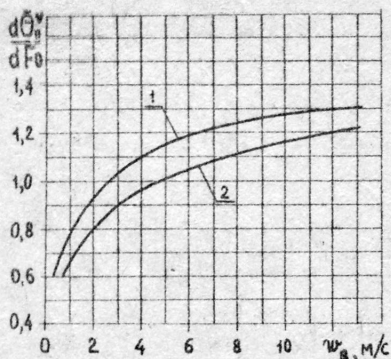


Рис. I. Зависимость скорости охлаждения пачки типа А при поперечном и продольном обдуве от скорости движения воздуха для  $W = I$ :

- 1 - поперечный обдув;
- 2 - продольный обдув.

С увеличением скорости воздуха в аппарате интенсивность охлаждения растет. Степень влияния скорости воздуха на интенсивность охлаждения зависит от величины скорости воздушного потока и его направления по отношению к пачке продукта. При отношении водяных эквивалентов  $W = I$  увеличение скорости воздуха от 0,5 до 1,5 м/с приводит к увеличению скорости охлаждения при поперечном обдуве на 37%, при продольном - на 40%. С дальнейшим увеличением скорости воздуха замедляется процесс охлаждения. При скоростях воздуха более 6 м/с увеличение скорости охлаждения составляет менее 2% на единицу прироста скорости воздуха. При одинаковых скоростях воздуха процесс охлаждения протекает более интенсивно при поперечном обдуве пачки, так как в этом случае коэффициент теплоотдачи примерно на 40% больше, чем при продольном обдуве. Таким образом, поперечный обдув пачки является предпочтительным. При отношениях водяных эквивалентов более единицы распределение температур по длине аппарата отлично от линейного. По этой причине скорость охлаждения продукта изменяется по длине аппарата, уменьшаясь по мере продвижения пачки к выходу из аппарата. Например, при  $W = 5$  для скорости воздуха 3,22 м/с ( $Bi = 3$ ) скорость охлаждения пачки типа А уменьшается с 4,9 в начале охлаждения до 2,5 в конце. При  $w_a > 3,22$  м/с ( $Bi > 3$ ) скорость охлаждения продукта в выходном сечении аппарата практически остается постоянной. Таким образом, увеличение скорости воздуха в аппарате имеет смысл только до определенного предела, значение которого зависит от величины отношения водяных эквивалентов.

Значительное влияние на интенсивность процесса теплообмена оказывает величина отношения водяных эквивалентов. Для количественной оценки влияния величины  $\bar{W}$  на распределение температур в аппарате по аналогии со скоростью охлаждения продукта в работе введено понятие скорости изменения температуры в зависимости от величины отношения водяных эквивалентов  $d\bar{\theta}_n^v/d\bar{W}$ . Установлено, что  $d\bar{\theta}_n^v/d\bar{W}$  по абсолютной величине уменьшается с увеличением  $\bar{W}$ . Например, на выходе из аппарата для

$Bi = 1,5$  средняя скорость изменения температуры продукта в интервале  $\bar{W} = 1,5$  уменьшается с 0,9 до 0,18. Причем, наиболее сильное влияние величины  $\bar{W}$  на скорость изменения температуры продукта обнаружено в интервале  $\bar{W} = 1,2,5$ . Вышеназванные цифры относятся к пачкам типа А. Аналогичный характер влияния величины  $\bar{W}$  на скорость изменения температуры продукта обнаружен и у остальных исследуемых типоразмеров пачек продукта. Таким образом, для интенсификации процесса охлаждения целесообразно увеличение отношения водяных эквивалентов более четырех. Более предпочтительными в этом смысле являются режимы работы аппарата, в которых отношение водяных эквивалентов находится в пределах  $\bar{W} = 1,3$ .

С увеличением отношения водяных эквивалентов относительная избыточная температура воздуха стремится к единице ( $\theta_a \rightarrow 1$ ) а температура слоя — к пределу, равному средней избыточной температуре пачки при охлаждении ее в среде с постоянной температурой ( $\bar{\theta}_n^v \rightarrow \bar{U}_n^v$ ). Последняя вычисляется по формуле

$$\bar{U}_n^v = \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 U_n d\bar{x} d\bar{y} d\bar{z}, \quad \dots (17)$$

где  $U_n$  определяется по (9). Проведенное сравнение результатов расчета показало, что погрешность расчета относительной избыточной температуры по формуле (17) возрастает с увеличением  $Bi$  и уменьшается с ростом  $\bar{W}$ . При оптимальных (с точки зрения интенсификации процесса охлаждения) режимах работы аппарата ( $Bi > 2,5; \bar{W} < 3$ ) относительная погрешность вычисления средней по объему температуры продукта  $\bar{\theta}_n^v$  по (17) превышает 14,5%.

Для оценки погрешности расчета по приближенным формулам (14-16) дополнительно были рассчитаны четыре режима работы аппарата. Для численного эксперимента была взята пачка маргарина

с размером сторон  $0,05 \times 0,05 \times 1,0$  м. На основе анализа результатов расчета установлено, что погрешность вычисления по (16) менее 10% возможна только при условии  $Fo > 1$ .

В третьей главе приводится описание методики и результатов модельного экспериментального исследования процесса теплообмена в аппаратах интенсивного охлаждения конвейерного типа, дается анализ сопоставления результатов математического моделирования процесса с экспериментальными данными.

Экспериментальный стенд, выполненный на базе климатической камеры "Feutzon" позволил моделировать процесс теплообмена в подвижном слое массивных тел с помощью охлаждения отдельного неподвижного опытного образца. Основная идея методики проведения испытаний заключалась в следующем: основное правило моделирования, сформулированное М.В.Жирпичевым и А.А.Гухманом, гласит: подобны процессы, у которых подобны условия однозначности и численно равны определяющие критерии. Таким образом, уравнения подобия рассматриваемой задачи

$$\Theta_8 = F_1(Bi_1, Bi_2, Bi_3, Fo_{n1}, Fo_{n2}, Fo_{n3}, \bar{W}, \bar{\ell}) \quad \dots (18)$$

$$\bar{\Theta}_n^v = F_2(Bi_1, Bi_2, Bi_3, Fo_{n1}, Fo_{n2}, Fo_{n3}, \bar{W}, \bar{\ell}) \quad \dots (19)$$

$$\bar{\Theta}_n = F_3(Bi_1, Bi_2, Bi_3, Fo_{n1}, Fo_{n2}, Fo_{n3}, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{W}, \bar{\ell}) \quad \dots (20)$$

при конкретных фиксированных значениях чисел подобия, входящих в правую часть этих уравнений, однозначно определяют решение задачи о теплообмене в слое массивных тел в условиях работы конвейерных аппаратов. Отсюда следует, что если процесс охлаждения опытного образца проводить в условиях, когда выполняются условия подобия для температуры воздуха, то распределение температуры в опытном образце описывается уравнением (20) и, следовательно, соответствует действительной картине распределения температуры в пачке в подвижном слое в условиях работы аппарата. Учитывая тот факт, что безразмерная координата  $\bar{\ell}$ , входящая в правую часть уравнений подобия (18-20), выполняет одновременно роль текущего времени в безразмерном виде ( $\bar{\ell} = \ell/L = w_n \tau / w_n \tau_{nk} \equiv \tau / \tau_{nk}$ ), закон изменения температуры воздуха по длине аппарата был смоделирован во времени, что позволило провести исследование

процесса при охлаждении неподвижного образца.

Экспериментальное исследование проводилось на двух образцах, изготовленных из полиметилметакрилата. Регистрация температур производилась термоэлектрическим методом с помощью хромель-копелевых термопар. Результаты экспериментов были получены в виде графиков изменения температуры в испытательном помещении и в контрольных точках опытных образцов, которые затем были обработаны и представлены в форме графических и табличных зависимостей относительных избыточных температур от безразмерного времени.

В качестве критерия сопоставления расчетных величин с результатами эксперимента было принято относительное отклонение, определяемое по формуле

$$V = \frac{\sigma_{\theta}}{\theta} \dots 100\% , \quad \dots (21)$$

где  $\sigma_{\theta}$  — среднее квадратичное отклонение расчетной величины от опытных данных;

$\theta$  — величина параметра (относительная или абсолютная температура), полученная расчетным путем или в эксперименте.

Среднее квадратичное отклонение расчетных температур от опытных значений находилось по формуле

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{\frac{(a_1 - A_1)^2 + (a_2 - A_2)^2 + \dots + (a_n - A_n)^2}{n - 1}} \quad \dots (22)$$

Из (22) среднее квадратичное отклонение абсолютных температур

$$\sigma_T = \sigma_{\theta} (T_{\text{пн}} - T_{\text{вк}}) . \quad \dots (23)$$

Результаты проведенного сопоставления представлены на рис.2 в виде совокупности точек, характеризующих расхождение расчетных и экспериментальных значений относительных избыточных температур воздуха и опытных образцов в каждом из проведенных опытов.

Следует отметить, что для получения расчетных значений относительных температур использовались не отдельные коэффициенты теплоотдачи на противоположных гранях образцов, а среднее значение коэффициента теплоотдачи, подсчитываемое по формуле

$$Nu = 0,12 Re^{0,65} \quad \dots (24)$$

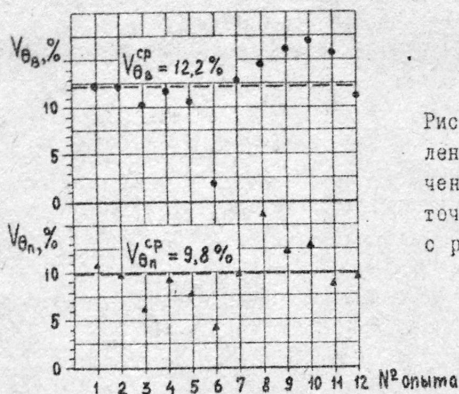


Рис.2. Результаты сопоставления экспериментальных значений относительных и избыточных температур  $\theta_{\text{в}}$  и  $\theta_{\text{п}}$  с расчетными

На основе анализа результатов проведенного сопоставления

установлено:

- в проведенных опытах относительное отклонение температуры воздуха в испытательном помещении  $V_{\theta_{\text{в}}}$  в среднем составило 12,2%. Таким образом, экспериментальный стенд позволяет моделировать процесс теплообмена в аппаратах интенсивного охлаждения с достаточной степенью точности;
- закономерного влияния скорости воздуха на величину относительного отклонения температуры в контрольных точках образцов  $V_{\theta_{\text{п}}}$  не обнаружено;
- максимальное отклонение температуры образцов равно 16,3%, а среднее - 9,8%;
- погрешность, вызванная несимметричностью (различием) условий теплообмена на противоположных поверхностях образцов, составляет примерно 5%.

Таким образом, результаты экспериментального исследования подтверждают разработанную методику расчета температурных полей в конвейерных аппаратах на основе принятой физико-математической модели.

В четвертой главе приводится методика расчета процесса теплообмена в аппаратах интенсивного охлаждения конвейерного типа и апробация ее при разработке аппарата для маргариновой промышленности.

На начальной стадии проектирования аппарата заданы его производительность, размеры упаковки и вид охлаждаемого продукта. В процессе расчета и проектирования необходимо определить различные характеристики аппарата. Разработанный метод

позволяет определять следующие характеристики аппарата: время охлаждения продукта, скорость движения грузового конвейера, скорость движения воздуха, площадь теплопередающей поверхности воздухоохладителя и основные конструктивные размеры грузового конвейера.

Дается описание поточных линий непрерывного действия для производства маргарина, рассматриваются существующие проблемы охлаждения маргарина, пути их решения. Проведенное сравнение капитальных затрат по различным вариантам показало, что наиболее экономичным вариантом решения проблемы охлаждения фасованного маргарина является внедрение конвейерных складчатых аппаратов.

На основе предложенной методики проведен расчет основных параметров и узлов аппарата производительностью 2500 кг/ч. Предложены рекомендации по использованию унифицированных узлов и сборочных единиц, применяемых в производстве мороженных аппаратов для закаливания мороженого.

#### В ы в о д ы

1. Проведено исследование динамики процесса теплообмена в аппаратах интенсивного охлаждения конвейерного типа с учетом изменения температуры охлаждающего воздуха во времени.

2. Обоснован выбор физической и разработана математическая модель для описания процессов теплообмена при охлаждении мелкофасованных пищевых продуктов в аппаратах конвейерного типа. Получено аналитическое решение краевой задачи для установившегося режима работы аппарата, позволяющее определять температуры воздуха и охлаждаемого продукта при любой длительности процесса охлаждения. Получен ряд формул для приближенного расчета процесса охлаждения пищевых продуктов в конвейерных аппаратах, в частности, для случая завершеного теплообмена. Полученные расчетные зависимости справедливы для тел в форме прямоугольного параллелепипеда.

3. В результате проведенных с помощью ЭВМ расчетов по предложенным зависимостям и их анализа показаны характер и степень влияния различных факторов на интенсивность процесса теплообмена. Установлено, что для интенсификации процесса охлаждения мелкофасованных пищевых продуктов нецелесообразно увеличивать скорость воздуха более 6 м/с и величину отношения водяных эквивалентов более четырех. На основе результатов

численного эксперимента показано, что при выполнении условия  $Fo \gg 1$  погрешность расчета с помощью приближенных формул не превышает 10%. Установлено, что допущение о постоянстве температуры воздуха в процессе охлаждения пищевых продуктов при оптимальных условиях работы аппарата ( $4 > Bi > 2,5$ ;  $1 < W < 3$ ) приводит к погрешности расчета температуры продукта, превышающей 14,5%.

4. Разработана и теоретически обоснована физическая модель, с помощью которой имитирован процесс теплообмена в аппарате. На основе этой модели создана экспериментальная установка и проведено экспериментальное исследование динамики процесса охлаждения.

5. Сопоставление результатов, полученных путем расчета на ЭВМ по математической модели, с экспериментальными данными показало, что среднее расхождение равно 9,8%, а максимальное – 16,3%. Экспериментально установлено, что в диапазоне скоростей воздуха  $1,5 \pm 4,6$  м/с погрешность вычисления температур, обусловленная принятым допущением о равенстве коэффициентов теплоотдачи на противоположных гранях прямоугольного параллелепипеда, составляет примерно 5%. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность применения полученного решения для расчета процессов теплообмена в аппаратах интенсивного охлаждения конвейерного типа.

6. Разработана методика расчета процесса теплообмена при охлаждении мелкофасованных пищевых продуктов в форме прямоугольного параллелепипеда в конвейерных аппаратах, работающих по принципу прямо- или противотока. Представлены результаты расчетов аппарата, выполненные на основе предложенной методики.

#### Условные обозначения

$T$  – абсолютная температура;  $\theta$  – относительная избыточная температура;  $t$  – текущее время;  $l$  – координата центра пачки продукта, отсчитываемая слева направо от входа продукта в аппарат;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $x, y, z$  – координаты произвольной точки в пачке продукта в системе координат, начало

которой совпадает с геометрическим центром пачки, а направление осей - с направлением осей симметрии пачки продукта;  
 $\alpha$  - коэффициент температуропроводности;  $w$  - скорость;  
 $\varphi$  - доля свободного сечения аппарата для прохода воздуха;  
 $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;  $\rho$  - плотность;  $c$  - удельная теплоемкость;  $F_j/L$  - удельная поверхность  $j$ -грани пачек продукта, приходящаяся на единицу объема рабочей камеры аппарата;  
 $L$  - длина аппарата;  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  - относительные координаты;  $\bar{W}$  - отношение водяных эквивалентов;  $2R_1, 2R_2, 2R_3$  - размеры пачки;  $\tau_{\text{пк}}$  - время пребывания пачки в аппарате;  $z_R$  - кратность  $k$  - корня;  $\tau$  - время, отсчитываемое от момента входа пачки в аппарат.

Индексы: о - начальное условие; к - конечное условие; п - продукт; в - воздух;  $\mathcal{S}$  - поверхность;  $\mathcal{V}$  - объем;  $\bar{L}$  - изображенные функции;  $-$  - среднее значение величины.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Агафонов Н.Н., Чистяков Ф.М., Харитонов В.П. Охлаждение слоя массивных тел в форме прямоугольного параллелепипеда в условиях противотока. - Инженерно-физический журнал, 1981, т.10, № 6, с.1107-1108. - Статья деп. в ВИНТИ, полный текст 0,45 а.л., рег. № 5303-80 Деп.
2. Агафонов Н.Н., Чистяков Ф.М., Харитонов В.П. Процесс теплообмена в скороохлаждающих аппаратах конвейерного типа. - Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. Л., 1981, с.74.
3. Охлаждение готовых изделий в порционной упаковке / Н.Н.Агафонов, С.Г.Дегтяренко, А.А.Журин, С.Д.Ильин. - Общественное питание, 1981, №7, с.53.
4. А.с. 914020 ( СССР). Способ хранения маргарина, расфасованного в пачки весом по 0,2-0,25 кг./ Н.Н.Агафонов, В.В.Ребрина, В.П.Харитонов. Заявл. 19.12.79 № 2853751/28-13; Опубл. в Б.И., 1982, № 11; МКИ А 23D 3/02. - УДК 637.664.3 (088.8).

*Агафонов*

Л - 90641 от 5.06.1982 Заказ 900

О.зем I п.л.

Тираж 100 экз.

Ротапринт МВТУ

107005, 2-я Бауманская ул. д.5