

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

---

На правах рукописи

ОВСЯНИК Анатолий Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОБМЕНА  
ВО ФРИЗЕРАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Специальность 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

ОДЕССА - 1981 г.

✓

к

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Расширенная программа дальнейшего повышения материального уровня жизни народа, провозглашенная XXVI съездом КПСС, предусматривает дальнейшее развитие системы холодильников и их производственных цехов, совершенствование, модернизацию и создание новых видов холодильного оборудования, в том числе для фабрик и цехов мороженого.

В настоящее время около 80% всей прибыли, получаемой холодильно-комбинатами, приходится на долю фабрик и цехов мороженого, поэтому вопросы интенсификации процессов теплообмена в аппаратах по производству мороженого, совершенствованию этих аппаратов должно быть уделено особое внимание.

Несмотря на длительное существование машинного способа производства мороженого, методика расчета аппаратов по производству мороженого (фризеров) и выбор геометрических параметров их теплопередающей поверхности базируется на эмпирических зависимостях, а действительные тепловые процессы, происходящие на поверхностях рабочих цилиндров фризеров, практически не изучались.

### Цель работы:

- теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена в аппаратах по производству мороженого (фризерах); математическое моделирование процессов теплообмена во фризере и решение математической модели; анализ полученных данных по теплообмену;

- формулировка основных положений по интенсификации процессов теплообмена во фризере; интенсификация процесса фазового перехода во фризере путем предварительной магнитной обработки смеси мороженого и применение винтового магнететеля;

- разработка методики теплового и конструктивного расчета

БИБЛИОТЕКА

фризеров.

В работе защищается следующее научное положение. Предварительное воздействие постоянного магнитного поля на смесь мороженого, движущуюся по трубопроводу, приводит к уменьшению продолжительности процесса замораживания смеси во фризере.

Основные научные результаты, полученные в работе.

Аналитически и экспериментально определена длина участка охлаждения смеси до температуры кристаллизации. С помощью полученной зависимости для этого участка представляется возможным определять температуру стенки цилиндра и охлаждаемой смеси по длине цилиндра. Интенсивность охлаждения смеси зависит от температуры кипения хладагента и безразмерного параметра  $P$ .

Определены оптимальные значения расхода, температуры кипения и кратности циркуляции хладагента для получения максимальной производительности фризера.

Расчет процессов теплообмена на начальном участке цилиндра фризера на основе решения уравнения энергии для потока смеси и уравнения теплопроводности стенки удовлетворительно согласуется с опытными данными.

Применение винтового нагнетателя интенсифицирует процесс кристаллизации смеси мороженого за счет уменьшения толщины намерзаемого его слоя на стенке цилиндра.

Экспериментально определены напряженность постоянного магнитного поля и скорость движения смеси при прохождении через него.

Практическая значимость и реализация. Экспериментально установлено, что: предварительная магнитная обработка смеси мороженого в совокупности с применением винтового нагнетателя позволяет интенсифицировать процесс фризирования и увеличить производительность фризера на  $12 + 15\%$ ; напряженность постоянного магнитного

поля должна быть в пределах  $(32 + 144) \cdot 10^8$  А/м; кратность обработки смеси в ПМП должна составлять 4 + 5 при скорости движения потока 0,8 + 2,0 м/с.

Разработана методика теплового и конструктивного расчета фризеров непрерывного действия и аппаратов подобного типа, позволяющая учитывать особенность теплообмена в зонах при определении длины участков.

Результаты настоящей работы внедрены на Одесском городском холодильнике "Укроптмясомолторга".

Апробация работы и публикации. Основные результаты исследований доложены на следующих конференциях и совещаниях: заседании секции КНТ СССР "Интенсификация и совершенствование процессов холодильной обработки и способов консервирования пищевых продуктов с применением холода" (Одесса, 1979 г.); IV Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых (Одесса, 1979 г.); Республиканском семинаре главных инженеров предприятий "Укроптмясомолторг" (Львов, 1979 г.). По теме диссертации опубликовано две печатные работы, получено авторское свидетельство №807007, 1981 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Работа содержит 121 страницу машинописного текста, 48 рисунков и 20 таблиц; в приложении дан список использованной литературы, содержащий 85 наименований.

Содержание работы. В главе I представлена общая холодильная технология производства мороженого, существующие технологические линии и аппараты, рассмотрены тепловые процессы и теплопередача в аппаратах технологических линий.

В СССР производство мороженого осуществляется на хладокомбинатах (около 5% всего объема производства) и предприятиях мясо-

молочной промышленности. Значительная часть холода, вырабатываемая компрессорными цехами хладокомбинатов, идет на ведение технологического процесса в цехах мороженого: охлаждение смеси, фризерование, закаливание мороженого в скороморозильных камерах или аппаратах.

Исходя из анализа технологических процессов и литературных источников по теплопередаче при фризеровании мороженого вытекают следующие задачи: рациональное ведение технологического процесса, исключая непроизводительные потери холода; исследование и интенсификация процессов теплообмена во фризерах и скороморозильных аппаратах с увеличением производительности поточно-механизированных линий; модернизация существующих и создание новых фризеров и скороморозильных аппаратов на более высоком техническом уровне. На основе анализа существующих аппаратов и технологии производства мороженого в главе I сформулированы задачи исследования:

- теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена на участке охлаждения и замораживания смеси в цилиндре фризера с построением математической модели с целью получения зависимостей для расчета и проектирования фризеров непрерывного действия;

- теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена на участке охлаждения и замораживания смеси в цилиндре фризера с построением математической модели с целью получения зависимостей для расчета и проектирования фризеров непрерывного действия;

- теоретическое и экспериментальное исследование интенсификации процесса замораживания смеси во фризере при предварительной обработке ее в постоянном магнитном поле с целью разработки рекомендаций по применению омагничивания смеси и внедрению данного

способа в производство.

В главе II рассматривается математическая модель тепловых процессов во фризерах, приведены результаты анализа полученных аналитических данных по теплообмену, формулируются основные положения по интенсификации процесса теплообмена во фризерах.

Основными тепловыми процессами, происходящими во фризерах, являются охлаждение смеси, кристаллизация воды, находящейся в смеси, и переохлаждение смеси от температуры замерзания до конечной. Вопросы конвективного теплообмена на начальном участке каналов занимались многие исследователи, но до недавнего времени такие задачи ставились как не сопряженные. При теоретических расчетах обычно предполагали, что условия на обтекаемой поверхности заданы и постоянны. Однако температура стенки фризера является переменной и зависит от пространственной координаты. Это относится в первую очередь к высокоинтенсивным процессам теплообмена. Более корректной постановкой задачи конвективного теплообмена при обтекании тела жидкостью является постановка ее как сопряженной.

Постановка задачи. В цилиндр фризера, радиусом  $r_0$  и толщиной стенки  $\delta$ , поступает смесь мороженого с температурой  $T_2^{*x} = const$  и скоростью  $V = const$ . Коэффициенты теплопроводности стенки фризера и смеси соответственно  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Коэффициент температуропроводности смеси  $a_2$ . На внешней поверхности цилиндра кипит хладагент с температурой  $T_0 = const$ . Коэффициент теплоотдачи от стенки цилиндра к хладагенту -  $\alpha_0$ . При движении по цилиндру смесь мороженого на первом участке понижает свою температуру от  $T_2^{*x}$  до  $T_2 = T_{np} = const$ . На втором участке смесь кристаллизуется, намораживается до толщины  $\xi$  и переохлаждается до требуемого значения (рис. I).

При постановке задачи сделаны следующие допущения:

- теплофизические характеристики жидкости и стенки не изме-

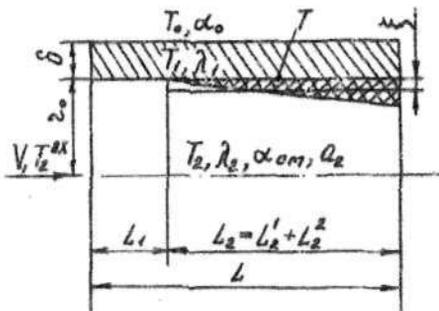


Рис. 1 Схема задачи

соответствующим температурам, неизменны; процесс кристаллизации слоя смеси обусловлен только передачей тепла путем теплопроводности.

В соответствии со сделанными допущениями математическая модель Фризера описывается следующими уравнениями:

Для первого участка  $L_1$ . На начальном участке Фризера (рис. 2) происходит процесс конвективного теплообмена и температура смеси понижается от  $T_2^{sk}$  до температуры кристаллизации  $T_{кр}$ . Процесс теплообмена на этом участке стационарный.

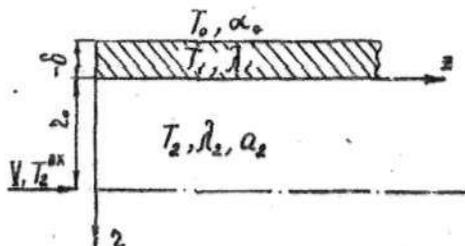


Рис. 2. Схема первого участка цилиндра Фризера

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial T_1}{\partial z} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial z} = \alpha_1 (T_1 - T_0), \quad \alpha_1 = \frac{\alpha_0}{\lambda_1}$$

$$2_0 < z < R \quad (I)$$

$$z = R; \quad T_1 = T_2^{sk} \quad z = z_0, \quad z = 0$$

няются на первом участке; скорость среды задана по степенному закону в пристеночной области; температура поверхности разделы фаз не изменяется в течение всего процесса и равна криоскопической температуре смеси; теплофизические характеристики замороженного слоя смеси и стенки, определяемые по

Решается сопряженная задача конвективного теплообмена, описывающая процесс теплообмена на начальном участке Фризера:

а) Уравнение теплопроводности для стенки цилиндра

б) Уравнение энергии для движущейся жидкости

$$U(z) \frac{\partial T_2}{\partial z} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$T_2 = T_2^{ex} \quad z = z_0, \quad z = 0; \quad \frac{\partial T_2}{\partial z} = 0 \quad z = 0$$

в) Условия сопряжения

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \quad z = z_0 \quad (3)$$

$$T_1 = T_2 \quad z = z_0$$

Приведя уравнения (1), (2) и (3) к безразмерному виду и используя интегральное преобразование Лапласа, получили решение уравнения (1) и (2) в виде:

для стенки цилиндра:

$$\Phi_1(z, \rho) = C_2 \left[ N_0(\rho z) - \frac{\rho N_0(\rho R) + \rho N_1(\rho R)}{\rho Y_0(\rho R) + \rho Y_1(\rho R)} Y_0(\rho R) \right] + \frac{1}{\rho} \frac{1 + PR \ell_2 z/R}{1 - PR \ell_2 z/R} \quad (4)$$

для жидкости:

$$\Phi_2(z, \rho) = C_1 \lambda^{1/2} (1-z)^{1/2} \left[ Y_{1/3} \left( \frac{2}{3} \sqrt{\rho a_1} \lambda (1-z)^{3/2} \right) + Y_{1/3} \left( \frac{2}{3} \sqrt{\rho a_1} \lambda (1-z)^{3/2} \right) \right] \quad (5)$$

Используя условие сопряжения (3), получим распределение температур на внутренней поверхности стенки цилиндра в безразмерной форме:

$$\theta_1(t, z) = \frac{PR}{1 - PR \ell_2 R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-s_n z}}{s_n^2 \psi(s_n)} \quad (6)$$

Корни  $s_n$  уравнения (6) определяются из выражения:

$$\frac{N_1(s_n) [\rho Y_1(s_n R) + s_n Y_1(s_n R)] - Y_1(s_n) [\rho N_0(s_n R) + s_n N_1(s_n R)]}{N_0(s_n) [\rho Y_0(s_n R) + s_n Y_0(s_n R)] - Y_0(s_n) [\rho N_0(s_n R) + s_n N_1(s_n R)]} = 0,7294 \lambda \sqrt{\frac{\lambda^2 a_1}{s_n^2}}$$

В размерной форме длина участка  $L_1$  запишется:

$$L_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z_0}{s_n} \ell_2 \left[ \frac{T_{np} - T_0}{T_2^{ex} - T_0} \cdot \frac{s_n^2 \psi(s_n) (1 - PR \ell_2 R)}{PR} \right] \quad (7)$$

Для второго участка  $L_2$ . На втором участке цилиндра фронт происходит кристаллизация смеси мороженого, смесь заморажи-

вается до требуемой температуры и подается на выход цилиндра фризера, т.е. второй участок цилиндра представляется как интенсивный вымораживатель. Концентрация вымороженной воды увеличивается по мере движения смеси от области начала кристаллизации до выхода из цилиндра. Схема задачи представлена на рис. 3.

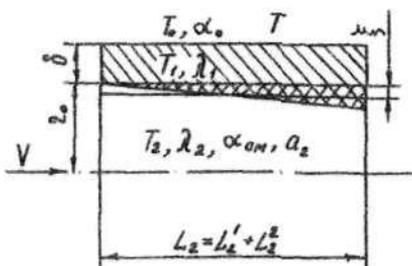


Рис. 3. Схема задачи второго участка цилиндра фризера

Задача теплообмена с фазовым переходом во фризере рассматривается также сопряженной и нестационарной.

В соответствии с допущениями математическая модель второго участка описывается уравнениями:

Для стенки цилиндра

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) \quad 2_0 \leq z \leq 2_0 + \delta \quad (8)$$

Для неморозиваемого слоя смеси

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) \quad 2_0 - \xi \leq z \leq 2_0 \quad (9)$$

Граничные условия

$$\frac{\partial T_1}{\partial z} = \frac{\alpha_0}{\lambda_1} (T_1 - T_0) \quad z = 2_0 + \delta \quad (10)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \alpha_{0m} (t_a - T_{кр}) + \rho \rho \frac{d\xi}{d\tau} \quad z = 2_0 - \xi \quad (11)$$

$$T_2 = T_{кр} \quad \text{при} \quad z = 2_0 - \xi \quad (12)$$

Условия сопряжения

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \quad \text{при} \quad z = 2_0 \quad (13)$$

$$T_1 = T_2 = T(\xi) \quad \text{при} \quad z = z_0 \quad (14)$$

При решении задачи используется известный приближенный метод, основанный на замене истинных температурных кривых их простейшими энтологами. Температура в стенке цилиндра и в слое смеси принимается:

$$T_1 = c_1 \ln z + c_2 ; \quad T_2 = c_3 \ln z + c_4$$

Определяя постоянные  $c_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) из условий (10), (14) и (12) находим  $T_1$  и  $T_2$ .

Значение температуры на границе раздела фаз  $T$  находится из условия сопряжения (13):

$$T = \frac{\lambda_2 T_{кр} \left( \frac{\lambda_1}{\alpha_0(z_0 + \delta)} + \ln \frac{z_0}{z_0 + \delta} \right) + \lambda_1 T_0 \ln \frac{z_0 - \xi}{z_0}}{\lambda_2 \left( \frac{\lambda_1}{\alpha_0(z_0 + \delta)} + \ln \frac{z_0}{z_0 + \delta} \right) + \lambda_1 \ln \frac{z_0 - \xi}{z_0}} \quad (15)$$

Формула (15) позволяет приблизительно рассчитать  $T$  в зависимости от толщины слоя  $\xi$ . Время намораживания слоя смеси толщиной  $\xi$  определяется из уравнения

$$\tau = \frac{\rho \beta}{\alpha_{см}(t_c - T_{кр})} \left[ \frac{B}{B-A} \xi - \frac{A(1+B)}{2z_0(B-A)^2} \xi^2 \right] \quad (16)$$

Формула (16) позволяет приблизительно определить время образования намораживаемого слоя заданной толщины или по заданному времени намораживания рассчитать толщину слоя либо производительность.

На ЭЕМ была исследована динамика тепловых процессов, происходящих во фризере, по составленным программам.

Рассчитанное по формуле (7) значение первого участка удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Анализ полученных расчетов по уравнениям (7) и (16) показал, что длина участка охлаждения смеси  $L_1$  зависит от безразмерно-

го параметра  $P = \alpha \cdot z_0 / \lambda_1$  и температуры кипения хладагента.

В главе III рассматриваются вопросы строения молекулы воды, приводятся методика и результаты исследования замораживания воды и смеси мороженого в постоянном магнитном поле при их движении в трубах круглого сечения.

В последние годы возникла проблема направленного изменения свойств воды и систем ее содержащих различными физическими воздействиями, в частности, действием магнитных полей. Эта проблема еще не изучена, поэтому обобщение ее данных связано с определенными трудностями - появление дополнительных сведений вызывает необходимость внесения существенных уточнений.

В работах Каухчешвили Э.И., Озирной Д.И., Бантиш Л.А. проведены исследования изменений физико-химических свойств воды и систем ее содержащих (яблочный сок, мясо) под воздействием постоянного магнитного поля (ПМП). В частности, изучался вопрос о влиянии магнитной обработки воды и водных систем на продолжительность процесса кристаллизации при их замораживании. При этом авторы показали, что слабые магнитные поля не влияют на качество и пищевую ценность продуктов, а в ряде случаев даже улучшают качество за счет более мелких кристаллов льда, образующихся при замораживании продуктов.

В главе III приведены результаты предварительной обработки в ПМП потока воды и смеси мороженого с последующим их замораживанием. Исследования проводились на стенде, состоящем из электромагнита, подключенного к электрическому щиту, позволяющему осуществлять питание электромагнита постоянным электрическим током, напряжением  $10 \pm 60$  В. Напряженность ПМП в пределах  $32 \cdot 10^3 + 144 \cdot 10^3$  А/м регулировалась изменением напряжения либо изменением зазора между полюсами электромагнита. Измерение на-

пряженности ПМП осуществлялось прибором МИМ-3. В бикетку, нижний конец которой помещался между полюсами электромагнита, а вливалась исследуемая жидкость, скорость истечения которой могла регулироваться. Жидкость сливалась в пробирку, проходя через ПМП. Пробирки с обработанной и не обработанной в ПМП жидкостью помещались в термостат, температура в котором поддерживалась в диапазоне минус 14 + минус 20°C. Температуру смеси контролировали медь-константановыми термопарами с точностью до 0,1°C.

Обработке подвергалась надистиллированная вода с температурой 18°C и сливочная смесь мороженого с температурой 8 + 10°C. Анализ графических зависимостей показал, что предварительная обработка исследуемых жидкостей, движущихся в ПМП, не оказывает заметного влияния на характер и интенсивность процессов понижения температуры от начальной до криоскопической и от криоскопической до конечной, но продолжительность процессов кристаллизации при этом сокращается на 10-30%. Для достижения эффекта кратность обработки исследуемых жидкостей в ПМП с напряженностью  $(32 + 144) \cdot 10^9$  А/м должна быть не менее 4 + 5.

На основании рассмотренных известных гипотез о структуре воды и о механизме воздействия ПМП на водосодержащие системы можно сделать вывод о том, что интенсификация процессов кристаллизации возможна лишь за счет уменьшения количества тепла, идущего на замораживание при обработке водосодержащих систем в ПМП.

Так как смесь мороженого более чем на 60% состоит из воды, а во фризере при производстве мороженого происходит фазовый переход воды — лед, то представляется возможным интенсифицировать процесс фазового перехода во фризере путем предварительной магнитной обработки подаваемой смеси в ПМП.

В главе IV приводится конструкция экспериментального стенда на промышленной установке для исследования теплообмена во фри-

зере и описана методика экспериментального исследования. Принципиальная схема стенда показана на рис. 4.

Методика исследования процессов теплообмена во фризере непрерывного действия с насосно-циркуляционной системой охлаждения состояла в определении экспериментальным путем тепловой нагрузки, коэффициента теплопередачи и коэффициента теплоотдачи со стороны хладагента и смеси, кратности циркуляции хладагента при различных режимах фризирования смеси мороженого. Кроме того, проводилась проверка математической модели фризера на адекватность, т.е. определялось распределение температур экспериментальным путем по длине цилиндра фризера и проводилось сравнение экспериментальных данных с расчетными, полученными на основании решения математической модели фризера.

Тепловая нагрузка фризера определялась по формуле:

$$Q_{\varphi} = G_1 c_1 \Delta t + G_2 2' ; \quad G_2 = \frac{W_{\text{эл/гр}} - Q_{\text{ном}}}{i_2^n - i_1^n}$$

Потери тепла в грелке  $Q_{\text{ном}} = K_{\text{из}} F_{\text{эл/гр}} (t_2 - t_1)$

Кроме того,  $G_1$  определялось также с помощью диафрагмы.

Тепловая нагрузка фризера определялась и по смеси мороженого.

$$Q_{\varphi} = G_M [c_{\text{см}} (T_2^{\text{жк}} - T_{\text{кр}}) + c_M (T_{\text{кр}} - T_2^{\text{жк}})] + 335 G_2 + 3600 N_0 + Q_T$$

Коэффициент теплопередачи равен  $K = q_{\varphi} / \Delta \bar{t}$

Коэффициент теплоотдачи к хладагенту определялся как

$$\alpha_0 = Q_{\varphi} / F \Delta t = q_{\varphi} / \Delta t \tag{17}$$

и представлялся в виде графических зависимостей (рис. 5).

Определенные по формуле (17) значения  $\alpha_0$  сравнивались с коэффициентами теплоотдачи, рассчитанными по формуле Дениловой Г.И. и Куприяновой А.В. для области развитого кипения при температурах кипения хладагента от плюс 20°C до минус 40°C и удельных тепловых потоках 29000 + 87000 Вт/м<sup>2</sup>. Расхождения составили

20,5%.

Коэффициенты теплоотдачи к смеси мороженого определялись:

на первом участке  $\alpha_{см}^I = Q_0 / \pi d_0 L (q_{ф} \frac{\delta}{\lambda_1} - t_c)$

на втором и третьем  $\alpha_{см}^{II} = Q_0 / \pi d_0 L [q_{ф} (\frac{\delta}{\lambda_1} + \frac{\xi}{\lambda_2}) - t_c]$

В главе V приведены результаты экспериментальных исследований процессов теплообмена во фризере.

В процессе экспериментов определялись: расход хладагента; тепловая нагрузка фризера общая и по смеси; температурное распределение на наружной поверхности цилиндра фризера; температурное распределение на внутренней поверхности цилиндра; кратность циркуляции хладагента; температура и давление кипения хладагента; коэффициенты теплоотдачи со стороны хладагента и смеси: коэффициент теплопередачи цилиндра фризера; мощность, расходуемая на срезание намораживаемого слоя смеси.

Во всех случаях промышленных экспериментов смесь мороженого на выходе имела температуру минус 3,0 ± минус 4,5°С.

Коэффициент теплоотдачи со стороны хладагента (рис. 5) изменялся в пределах от 3700 Вт/м<sup>2</sup>град до 5200 Вт/м<sup>2</sup>град, а удельная тепловая нагрузка - соответственно, от 53600 Вт/м<sup>2</sup> до 81600 Вт/м<sup>2</sup>. Опытные значения коэффициента теплопередачи, отнесенного к наружной поверхности цилиндра фризера, изменялись в пределах 1360 ± 2300 Вт/м<sup>2</sup>град.

Опытные данные обрабатывались в критериальной форме без учета нестационарности процесса. Обработка опытных данных коэффициента теплоотдачи к хладагенту осуществлялась в виде зависимости

$$Nu_m = c Re_m^m K_p^n \quad (18)$$

Постоянные  $c$ ,  $m$ ,  $n$  уравнения (18) определялись методом наименьших квадратов.

Зависимость для определения коэффициента теплоотдачи аммиака для условий эксперимента имеет вид:

$$Nu_* = 23,5 \cdot 10^{-5} Re_*^{0,85} K_p^{0,73} \quad (19)$$

Зависимость (19) аппроксимирует опытные данные с точностью  $\pm 3,8\%$ . Максимальная относительная погрешность при определении коэффициента теплоотдачи аммиака составила  $\pm 5,7\%$ .

Опытные значения коэффициента теплоотдачи со стороны смеси представлены на рис. 6. Температура кипения хладагента изменялась в пределах минус 24 + минус 42°C, в удельные тепловые нагрузки без учета внешних теплопритоков составляли при этом 36000 + 66000 Вт/м<sup>2</sup>.

Характер зависимости  $\alpha_{см} = f(q_0)$  аналогичен зависимости  $\alpha_0 = f(q_0)$  и изменялся в пределах 2000 + 8700 Вт/м<sup>2</sup>град.

Коэффициент теплоотдачи со стороны смеси зависит в большей степени от удельного теплового потока  $q_0$  и температуры кипения хладагента  $T_0$ , поэтому в работе представлен в виде зависимости  $\alpha_{см} = A q_0^k p_0^l$ . Постоянные  $A$ ,  $k$ ,  $l$  определялись методом наименьших квадратов.

Для температур кипения хладагента минус 24 + минус 42°C и удельных тепловых нагрузок 36000 + 66000 Вт/м<sup>2</sup> зависимость для определения коэффициента теплоотдачи со стороны смеси имеет вид:

$$\alpha_{см} = 0,026 q_0^{1,1} p_0^{1,68} \quad (20)$$

и аппроксимирует опытные данные с точностью  $\pm 7,2\%$ . Максимальная относительная погрешность при определении коэффициента теплоотдачи со стороны смеси составила  $\pm 11\%$ .

В работе представлены опытные значения изменения температуры наружной и внутренней поверхности цилиндра фризера по длине в за-

зависимости от температуры кипения аммиака. Из анализа графических зависимостей  $T_1 = f(L)$  установлено, что цилиндр фризера имеет три зоны теплообмена: зона охлаждения смеси до температуры кристаллизации ( $L_1$ ), составляющая  $(0,06 + 0,08) L$ ; зона кристаллизации -  $L_2' = (0,56 + 0,60) L$  и зона переохлаждения смеси до требуемой температуры  $L_2'' = (0,32 + 0,38) L$ .

В рассматриваемом оптимальном интервале тепловых нагрузок фризера  $q_{\text{ф}}$  расход аммиака изменялся в пределах  $94 + 315$  кг/ч, что соответствует кратности циркуляции хладагента  $1,9 + 7,5$ .

Анализ экспериментальных данных по теплообмену в цилиндре фризера позволил выявить наиболее оптимальные режимы работы фризера (таблица I), при которых наблюдается наименьший расход хладагента и электроэнергии при наибольших значениях производительности фризера, тепловых нагрузок, коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи.

Таблица I

$T_0$	$G_1$	$G_m$	$q_{\text{ф}}$	$\alpha_0$	$\alpha_{\text{см}}$	$T_2^{\text{охла}}$	$Z$	$K$
-30	163	400	70500	4480	6050	-4	3,0	1980
-30	134	400	61800	4060	4850	-3,5	2,7	1740
-28	120	380	57800	3960	5500	-4	3,0	1330
-26	110	390	66500	4750	8700	-4,5	2,3	1800

При обработке смеси мороженого в ПМП напряженностью  $(32 + 144) \cdot 10^8$  А/м, движущейся со скоростью  $0,8 + 2,0$  м/с, наблюдалось уменьшение температуры мороженого на выходе из фризера на  $1,2 + 1,5^\circ\text{C}$  по сравнению с необработанным.

Предварительная обработка смеси мороженого приводит к интенсификации процесса замораживания ее во фризере, зона  $L_2'$  сокращается, а зона  $L_2''$  увеличивается. Представляется возмож-

ность увеличить производительность фризера при тех же значениях температуры мороженого на  $10 + 12\%$ .

Кроме того, были проведены эксперименты по определению производительности фризера при замене обычной мешалки винтовым нагнетателем (шнеком) при различных режимах фризирования. Испытания фризера со шнеком показали, что производительность его увеличивается на  $5 + 8\%$  по сравнению с фризером, оснащенный обычной мешалкой.

В главе У1 описана поточно-механизованная линия по производству мороженого, оснащенная шнековым фризером с предварительной обработкой смеси в постоянном магнитном поле и приводится технико-экономическое обоснование разрабатываемого аппарата.

Как показывали технико-экономические расчеты, при внедрении данного предложения экономический эффект составляет для фабрик и цехов мороженого средней производительности ( $\sim 4000$  тонн готовой продукции в год) 5 тыс. рублей в год на одну поточную линию в зависимости от ассортимента выпускаемой продукции и, кроме того, не требуется установки дополнительного оборудования.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель процессов теплообмена, происходящих в интенсивных охладителях.

2. Дано теоретическое обоснование распределения температур по длине цилиндра.

3. Результаты экспериментального исследования подтвердили предположения, высказанные в теоретической части о том, что длина участка охлаждения смеси до температуры кристаллизации составляет незначительную часть общей длины цилиндра фризера ( $6 + 8\%$ ). Значительную часть поверхности теплообмена составляет участок кристаллизации смеси ( $56 + 60\%$ ).

4. Разработана методика исследования теплообменных аппаратов с большими удельными тепловыми нагрузками, в том числе и для аппаратов с фазовым переходом вода  $\rightarrow$  лед.

5. Показано, что основное влияние на процессы теплообмена во фризере оказывают безразмерный параметр  $P$  и температура кипения хладагента.

6. Разработана методика расчета фризеров и аппаратов интенсивного охлаждения жидкостей (аппаратов, в которых происходит процесс фазового перехода).

7. Разработана методика эксперимента и определено влияние постоянного магнитного поля на процесс кристаллизации водосодержащих жидкостей. Определены пределы напряженности постоянного магнитного поля, составляющие  $(32 + 144) \cdot 10^3$  А/м при скорости среды  $0,8 + 2,0$  м/с.

8. Результаты экспериментальных исследований по оптимизации режима работы фризеров и по обработке смеси в ПМП внедрены на Одесском городском холодильнике "Укроптмясомолторга".

9. Экономический эффект, вызванный увеличением производительности фризеров и сокращением энергетических затрат на выработку мороженого, составляет около 5 тыс. руб/год на одну точную линию.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$T_1, T_2, t_e, T_{кр}, T_0$  - температура, соответственно, стенки цилиндра фризера, немороженного слоя смеси, свежей смеси, криоскопической смеси, кипения хладагента,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $z$  - радиальная координата, м;  $\tau$  - время, с;  $a_1, a_2$  - коэффициенты температуропроводности стенки цилиндра фризера и немороженного слоя смеси,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $r_0$  - внутренний радиус цилиндра, м;  $\delta$  - толщина стенки цилиндра, м;  $\xi$  - толщина немороженно-

го слоя смеси, м;  $\alpha_0$  - коэффициент теплоотдачи стенки цилиндра хладагенту, Вт/м<sup>2</sup>К;  $\lambda_1, \lambda_2$  - коэффициент теплопроводности, соответственно, стенки цилиндра и замороженного слоя смеси, Вт/м·К;  $T$  - температура внутренней поверхности цилиндра фризера, °С;  $\alpha_{см}$  - коэффициент теплоотдачи смеси, Вт/м<sup>2</sup>К;  $\rho$  - плотность замороженного слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  - удельная теплота кристаллизации смеси, Дж/кг;  $Q_{ф}$  - общая тепловая нагрузка фризера, Вт;  $G_1, G_2$  - соответственно, количество хладагента, прошедшее через фризер и испарившееся в охлаждающей рубашке, кг/ч;  $\Delta t$  - разность температуры входе хладагента и кипения его, К;  $Z'$  - скрытая теплота парообразования хладагента, Дж/кг;  $C_1, C_{см}, C_m$  - теплоемкость хладагента, смеси и мороженого, соответственно, Дж/кг К;  $G_{ж}$  - количество жидкого хладагента, поступающее в мерный бачок, кг/ч;  $G_m$  - производительность фризера, кг/ч;  $T_2^{жк}, T_2^{змж}$  - температуры, соответственно, поступающей смеси и мороженого на выходе из цилиндра, °С;  $G_B$  - масса вымороженной воды, кг/ч;  $N_B$  - расход мощности на работу мешалки, Вт;  $K$  - коэффициент теплопередачи цилиндра фризера, Вт/м<sup>2</sup>К;  $\bar{\Delta t}$  - средняя разность температур хладагента и смеси, °С;  $q_{ф}, q_0$  - удельные тепловые нагрузки фризера, соответственно, с учетом и без учета внешних тепловых притоков, Вт/м<sup>2</sup>;  $F'$  - наружная поверхность цилиндра фризера, м<sup>2</sup>;  $L_1$  - длина участка охлаждения смеси, м;  $(L_2 = L_2' + L_2^a)$  - длина участка замораживания смеси, м;  $Nu_*$  - критерий Нуссельте кипящего хладагента;  $Re_*$  - критерий Рейнольдса кипящего хладагента;  $K_p$  - критерий кипения;  $p_0$  - давление кипения хладагента, Н/м<sup>2</sup>.

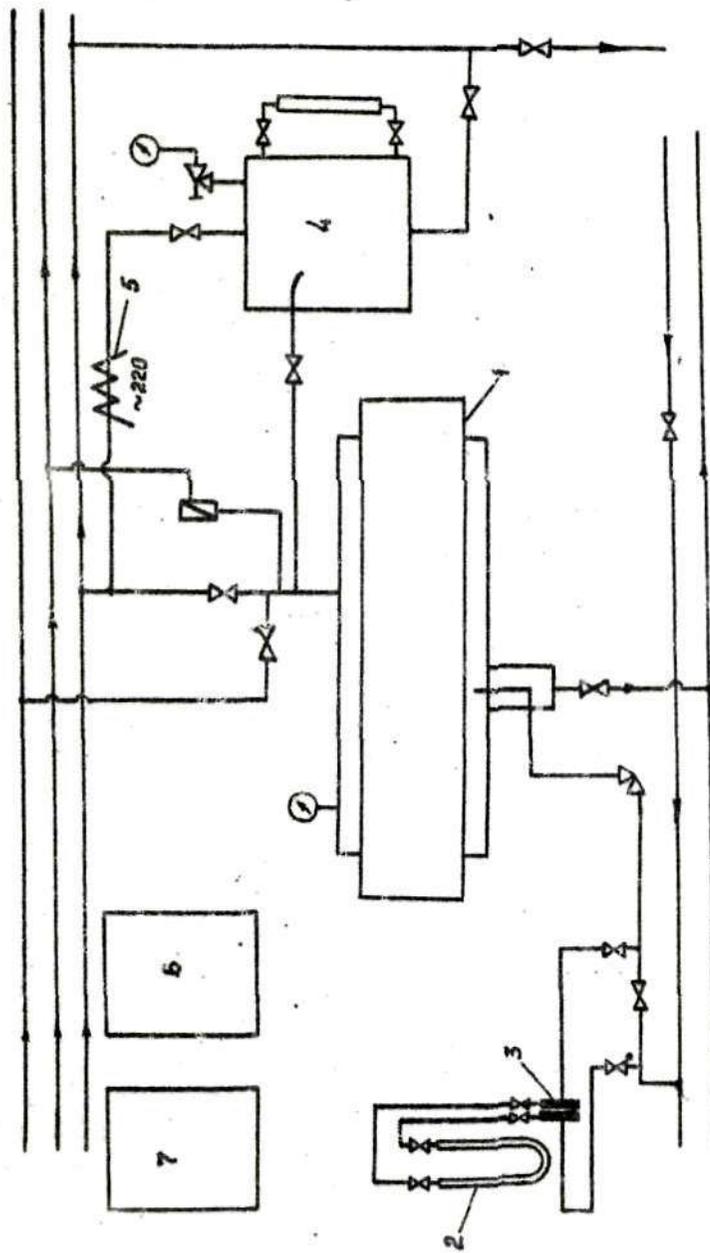


Рис. 4. Схема экспериментальной установки  
 1-цилиндр фрезера; 2-бароманометр; 3-диафрагма;  
 4-мерный бачок; 5-электронагреватель; 6-газениометр;  
 7-электрический мотор.

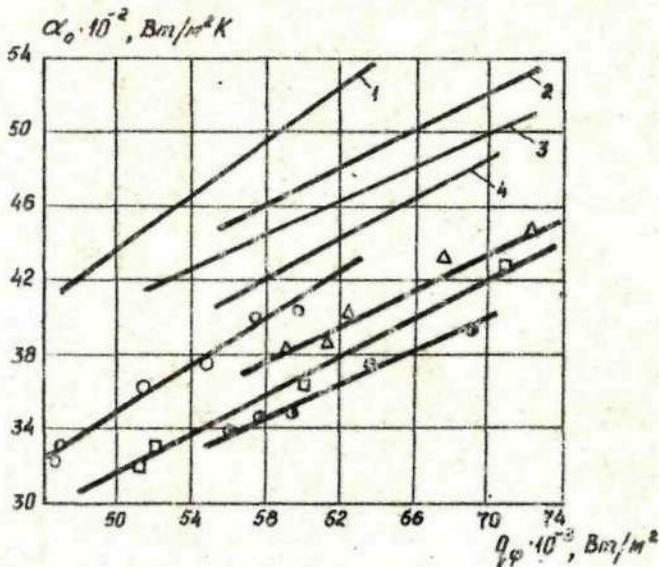


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи от удельной тепловой нагрузки фризера  $q_0$  при: 1,  $\Delta T_0 = -24 + -26^\circ C$ ; 2,  $\Delta T_0 = -30 + -32^\circ C$ ; 3,  $\square - T_0 = -35^\circ C$ ; 4,  $\circ - T_0 = -40 + -42^\circ C$ .

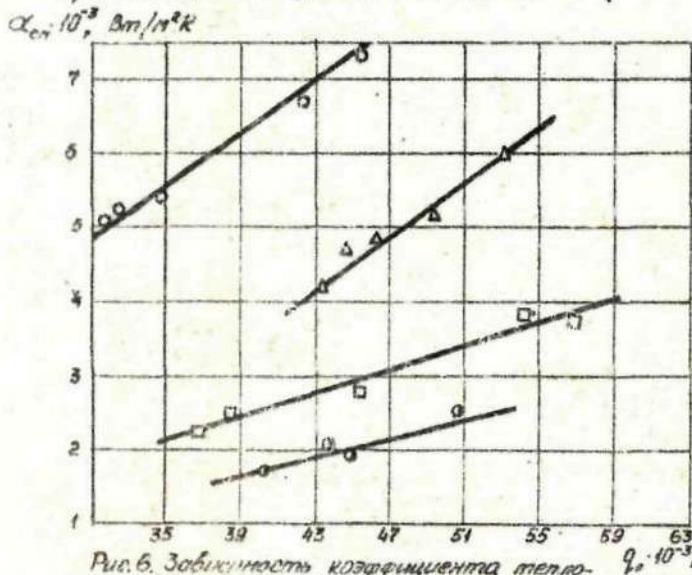


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи от удельной тепловой нагрузки фризера при:  $\circ - T_0 = -24 + -26^\circ C$ ;  $\Delta - T_0 = -30 + -32^\circ C$ ;  $\square - T_0 = -35^\circ C$ ;  $\circ - T_0 = -40 + -42^\circ C$ .

Основные положения диссертации изложены в следующих печатных работах:

1. Чумак И.Г., Овсянник А.В., Косой С.М. Скороморозильный аппарат. Авторское свидетельство № 807007, 1981 г.
2. Чумак И.Г., Овсянник А.В., Мурашов В.С. Влияние предварительной магнитной обработки смеси мороженого на продолжительность процесса кристаллизации воды в ней. - Холодильная промышленность и транспорт, М., ЦНИИТЭИ МММП, 1981, вып. XI, с.1-3.
3. Чумак И.Г., Овсянник А.В., Мурашов В.С. Интенсификация процесса фризирования смеси мороженого путем её предварительной магнитной обработки. Тезисы докладов IV Всесоюзного совещания "Магнитная обработка водных систем", М., 1981, с.103.