

Авторский
№-55
ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи

Аль-згул-Бассам



ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ МОЛОЧНОЙ
СЫВОРОТКИ МЕТОДОМ БЛОЧНОГО ВЫМОРАЖИВАНИЯ

Специальность: 05.18.12 - процессы, машины и агрегаты
пищевых производств

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1994

Авторефер.
А.

Работа выполнена в Одесской государственной академии пищевых технологий

Научный руководитель

доктор технических наук,
профессор Бурдо О.Г.

Официальные оппоненты

академик АНТК Украины
доктор технических наук,
профессор Чепурненко В.П.

кандидат технических наук,
доцент Дуканов И.И.

Ведущая организация

"Инженерно-технологический институт
"Биотехника" /г.Одесса/

Защита диссертации состоится 18 октября 1994 г. в 12⁰⁰ час.
на заседании специализированного ученого совета К 068.35.02 при
Одесской государственной академии пищевых технологий по адресу:
270039, г.Одесса, ул.Свердлова, 112, ОГАПТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОГАПТ.

Автореферат разослан 16 октября 1994 г.

ОНАХТ 21.10.10

Тепломассоперенос пр



v017125

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные технологии производства творага, сыра, казеина и повышение спроса на эти продукты привели к увеличению объема молочной сыворотки. Дешевые и простые способы избавления от сыворотки /орошение полей, сброс в стоочные воды/ создали серьезные экологические проблемы. Вместе с тем, растет число публикаций с данными о широком спектре лечебного действия молочной сыворотки. Бросовый, побочный продукт становится ценным сам по себе и в потенциале сможет превзойти по спросу основной. Мировое производство молочной сыворотки составляет около 100 млн. т в год, в которых содержится около 930 тыс. т ценнейшего белка. Однако, эффективное использование молочной сыворотки возможно при условии удаления части воды, которой в ней содержится 95%.

По сравнению с традиционным выпариванием технологии криоконцентрирования, кроме несомненных преимуществ в качестве продукта, становятся и более экономичными. Фирмы "Филлипс", "Тренко", "Страузер" и др. создали оборудование, в котором на удаление 1 т воды затрачивается 5,22 дол., из них энергозатраты составляют 2,73 дол., при соответствующих затратах в двухкорпусной выпарной установке 6,46 и 4,96 дол.

Перспективным путем получения концентратов молочной сыворотки является технология блочного вымораживания /ТБВ/. Используемые в этом методе аппараты конструктивно предельно просты, имеют малые габариты и энергопотребление. Однако, научные основы, методы расчета концентрирования растворов ТБВ на стержневых кристаллизаторах отсутствуют.

Цель работы. Создать научные основы и разработать методы расчета тепловых и массообменных процессов при концентрировании молочной сыворотки ТБВ на стержневых кристаллизаторах.

Поставленная цель определила задачи исследований.

1. Методами термодинамического и теплофизического анализа получить динамическую модель процесса блочной кристаллизации воды из раствора на стержневых охлаждаемых поверхностях.

2. Выполнить экспериментальные исследования и установить:

- влияние конструктивных и режимных параметров на кинетику роста блока льда, на его структуру, на структурные характеристики сыворотки и на показатели эффективности процесса разделения;
- влияние технологических параметров на процесс гравитационного

сепарирования блока.

3. Обобщить данные опытов и получить в критериальной форме уравнение для расчета интенсивности массопереноса при ТБВ.

4. Разработать методику и создать программу расчета на ЭВМ процессов концентрирования при блочном вымораживании.

5. Получить инженерную методику экспресс-оценки параметров процесса при блочном вымораживании воды из молочной сыворотки.

В работе защищаются следующие научные положения.

1. Процесс роста блока льда на стержневых поверхностях сопровождается ростом термического сопротивления самого блока и снижением термического сопротивления конвективной теплоотдачи на границе "жидкость-лед". При определенных условиях это может привести к снижению суммарного термического сопротивления теплопередачи "жидкость-поверхность стержневого кристаллизатора".

2. Формирование блока льда не в промывочной колонне, а на стадии кристаллизации обеспечивает более плотную укладку кристаллов, меньшую пористость блока. Это позволяет упростить технологию, разделить лед и продукт методом гравитационного сепарирования.

Новыми научными результатами работы являются:

- модель концентрирования при блочном вымораживании, которая устанавливает динамику роста блока льда, определяет поля температур в блоке, динамику изменения концентрации продукта;
- частные кинетические зависимости роста блока льда от диаметров кристаллизатора и концентратора, высоты блока, температуры кристаллизатора, начальной концентрации сыворотки, времени;
- частные кинетические зависимости структуры блока льда /его пористости, концентрации неводных компонентов/ от температурных условий, концентрации продукта и радиуса блока;
- частные кинетические зависимости концентрации продукта от геометрических параметров аппарата, температурных режимов, начальной концентрации продукта, размеров блока и времени;
- кинетические зависимости концентрации стоков при гравитационном сепарировании от начальной концентрации продукта, температур в блоке и среды;
- критериальное уравнение обобщающее результаты исследований процессов массопереноса;
- методика расчета процесса концентрирования растворов при блочном вымораживании.

Новыми практическими результатами являются:

- принципиальные схемы аппаратов для концентрирования пищевых жидкостей. В качестве кристаллизаторов рассмотрены стержневые испарители, трубки Фильда, игольчатые двухфазные термосифоны;
- экспериментальный модуль аппарата для концентрирования вымораживанием с объемом концентратора 10 л;
- программа расчета на ЭВМ технологических параметров ТБВ;
- номограмма для экспресс-оценки параметров ТБВ.

Результаты исследований использованы на Донецком механическом заводе "ТОР" при выполнении ОКР по созданию блочных кристаллизаторов молочной сыворотки.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников ОТИП им.М.В.Ломоносова в 1992...1994 г.г., на II Международной конференции по проблемам экологии и энергосбережения для агропромышленных комплексов /г.Одесса, 1992 г./, на Международной научно-технической конференции "Разработка и внедрение новых технологий и оборудования в пищевую и перерабатывающую отрасли АПК" /г.Киев, 1993/.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 5 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и приложения, изложена на 95 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, 14 таблиц, список использованной литературы из 130 источников, из которых 19 работ зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулирована цель и научные положения, поставлены задачи исследований.

В первой главе даны характеристики молочной сыворотки и технологий ее концентрирования: выпаривания, мембранного разделения, вымораживания. Рассмотрены теория и техника криоконцентрирования. Показаны энергетические и технологические преимущества метода по сравнению с выпариванием. На основе теплофизической классификации определены преимущества ТБВ по сравнению с различными технологиями криоконцентрирования. Показано, что снижение энергозатрат ТБВ достигается за счет резкого сокращения потерь холода /в первую

очередь из-за отсутствия циркуляционных контуров и механизмов/ при существенном упрощении установки /переход к аппаратному принципу на этапе кристаллизации, и применение гравитационного сепарирования/. Конкретизированы задачи исследований.

Во второй главе проведен анализ сопряженно протекающих тепло-массообменных, термодинамических и гидромеханических процессов ТВБ. Дана теплофизическая модель послойного формирования блока льда для различных отрезков времени с учетом изменения во времени структуры каждого слоя, записаны уравнения материального баланса для всех отрезков времени для жидкой фазы исходного продукта, льда, вязкости в порах блока. Учтены термодинамические аспекты ТВБ, рассмотрен предложенный механизм процесса в фазовой диаграмме Моэля.

Модель ТВБ представлена в цилиндрических координатах. В предположении, что параметры по азимуту не меняются, записана система уравнений, включающая движение фронта льдообразования /предполагается, что диффузионный пограничный слой больше теплового, что исключает кристаллизацию в объеме/:

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \beta \cdot \frac{\rho_m}{\rho_a} \cdot [x_m(r) - x_s(t_s)] \quad / 1 /$$

изменение влагосодержания раствора:

$$-\frac{\partial x_m}{\partial t} = \beta \cdot \frac{2r_u}{r_k^2 - r_a^2} \cdot [x_m(r) - x_s(t_s)] \quad / 2 /$$

известное уравнение температурного поля в цилиндрических координатах для блока льда и стенки испарителя, соответствующие уравнения связи, тепловых балансов и условий на границах. Влагосодержания, соответствующие условиям фазового равновесия, определяются по аппроксимациям криоскопических концентраций молочной сыворотки:

$$c_{\text{кр}} = 1,15 - 7,5t_m - 0,436t_m^2 \quad \text{при } t_m > -6^\circ\text{C} \quad / 3 /$$

$$c_{\text{кр}} = 100 [1 - \exp(0,06t_m)] \quad \text{при } t_m \leq -6^\circ\text{C} \quad / 4 /$$

Получена система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Если учесть, что в процессе разделения из одной гетерогенной системы /раствор/ образуется более сложная /пористый лед-раствор/, то решить такую систему сложно.

Модель упрощена при допущениях, что для некоторого интервала времени Δt задача рассматривается как квазистационарная, и характеризуется сосредоточенными параметрами t_m и x_m . Поскольку, структура блока пориста и имеет место молекулярная диффузия внутри блока, равновесное влагосодержание определяется по температуре поверхности кристаллизатора $[x_s(t_u)]$ и принимается эффективный коэффициент массоотдачи:

$$M_A = \beta_s \cdot \rho_m \cdot [x_m - x_s(t_u)] \cdot F_s \quad / 5 /$$

Выразив M_A через геометрические параметры, сведем задачу к поиску радиуса блока:

$$r_s = r_u \cdot \sqrt{1 + \left[\text{Sh} \cdot \text{Fo}' \cdot \frac{\rho_m}{\rho_s} \cdot (x_m - x_s) \right]^2 + \text{Sh} \cdot \text{Fo}' \cdot \frac{\rho_m}{\rho_s} \cdot (x_m - x_s)} \quad / 6 /$$

Задачей экспериментальных исследований является установить зависимость числа Sh от Ra , Pr и конструктивного параметрического комплекса $K = d_u / h_A$.

Составлена программа для ПЭМ и выполнен компьютерный эксперимент по анализу влияния d_u , d_k , t_u , t_m , c_m , h_A на тепловое состояние системы "сыворотка-блок льда-кристаллизатор" /рис.1/. Установлено, что $d_u = 150$ мм обеспечит получение критического диаметра льда при котором $\text{Bi} = 1$. В диапазоне $0 \leq t_u \leq -20^\circ\text{C}$ максимальная плотность теплового потока составит 1 кВт/м² при $d_u = 45$ мм и 2 кВт/м² при работе с кристаллизаторами $d_u = 10$ мм.

Полученные результаты не распространяются количественно на массообмен, но они позволяют спроектировать аппарат, создающий предпосылки для предельных характеристик массообмена.

В третьей главе представлены результаты экспериментов, методика которых предусматривала комплексные исследования процессов роста блока льда, его структуры, кинетики структуры продукта и процесса гравитационного сепарирования.

Опыты проводились на трех экспериментальных установках, которые отличались системой охлаждения /непосредственное испарение хладона R-12 в кристаллизаторах со специальной аставкой при $d_u = 47$ мм и охлаждение водоглицериновой смеси в кристаллизаторах - трубах Фильда с $d_u = 18; 23$ / мм, значениями $d_k = 38; 62; 150$ / мм, $h_A = 0,2; 0,42; 0,85$ / м. Температурное поле по радиусу блока

Тепловые режимы при блочном вымораживании

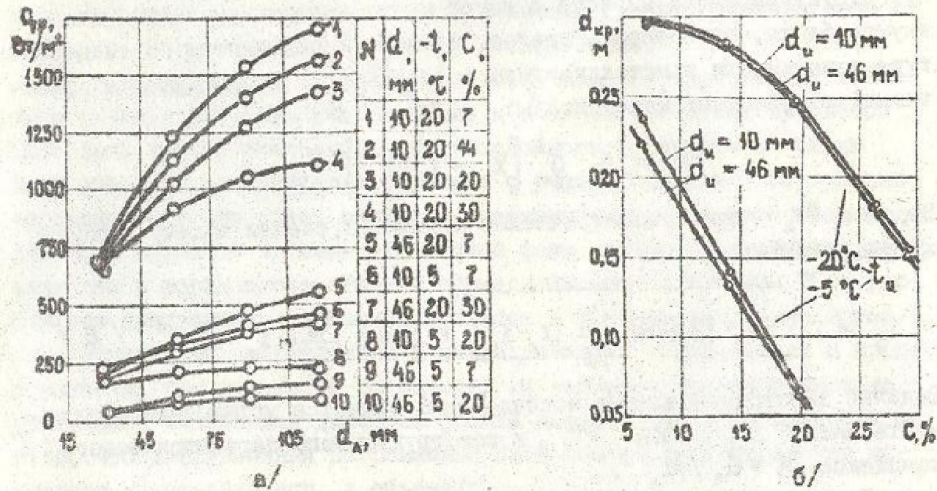


Рис.1

Изменение концентрации жидкости /а/, блока /б/, стоков /в/

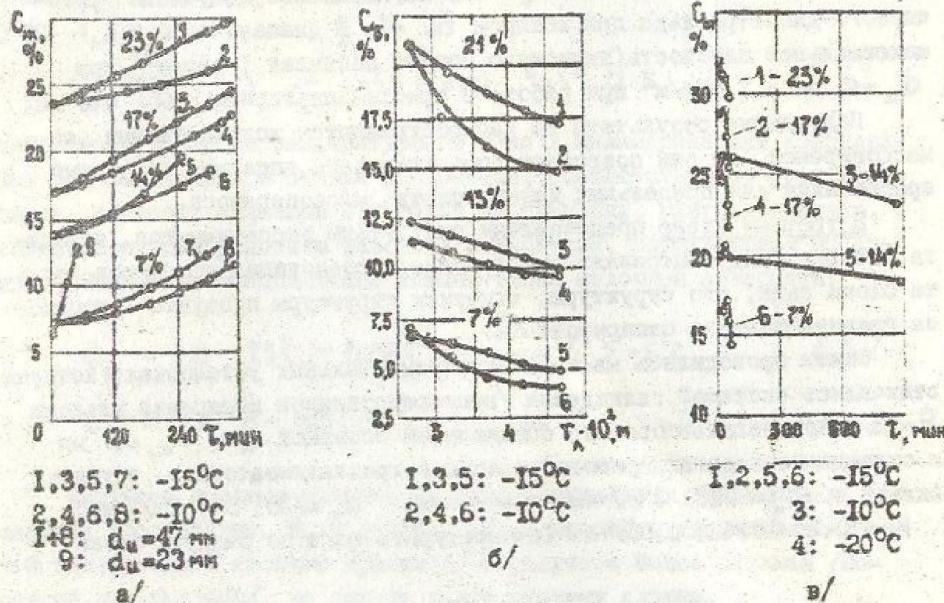


Рис.2

льда и в жидкости измерялось с помощью 8 медь-константановых термомпар, которые с шагом 5 мм укреплялись в специальной гребенке на кристаллизаторе. Измерение температур осуществлялось цифровым микровольтметром Ц-68003.

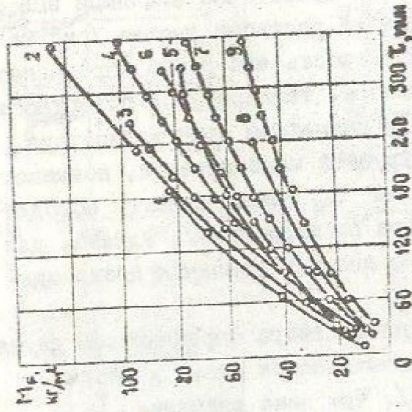
Концентрации продукта измерялись рефрактометром. Для исследования структуры блока изготовлен специальный прибор, состоящий из 6 герметичных кольцевых полостей. Прибор позволял отдельно для каждого слоя блока /температура и в котором измерялась/ получать информацию о концентрациях и количествах стоков и расплава.

Анализируя результаты опытов /рис.2.3/ можно констатировать.

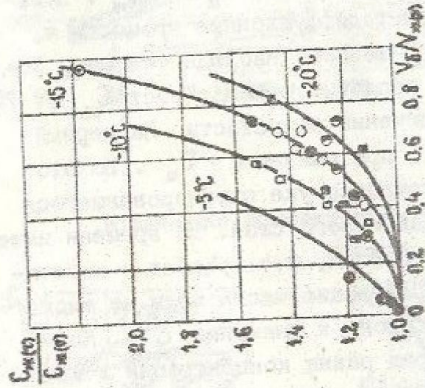
1. Структура блока льда, его пористость, концентрация в блоке неводных компонентов, определяется параметрами t_u и $C_{ж}$. Повышение концентрации сыворотки замедляет диффузионные процессы и, при той же интенсивности тепловых процессов, наблюдается рост более пористого слоя. При идентичных тепловых режимах рост $C_{ж}$ от 7% до 20% приводит к трехкратному увеличению пористости. На первый взгляд парадоксально уменьшение ϵ при снижении t_u . Но это свидетельствует, что происходит уплотнение уже сформировавшегося ледяного блока в процессе образования нового слоя. Во времени имеет место уменьшение величины теплового потока, т.е. растет и переохлаждение слоев. Это приводит к вымораживанию части воды из жидкости в объеме слоя, т.е. к уплотнению слоя, к снижению ϵ . Концентрация неводных компонентов в порах равна концентрации в криоскопических условиях, т.е. для средней температуры слоя. При повышении температуры слоев по радиусу блока льда, концентрация неводных компонентов снижается /рис.2б/. Это достаточно значимый вывод, если учесть, что во времени концентрация раствора растет /рис.2а/.

2. При формировании блока льда скорость его роста определяется концентрацией и температурой раствора, температурой поверхности кристаллизатора, высотой блока льда и диаметром кристаллизатора. С уменьшением $C_{ж}$ и t_u интенсифицируется массоперенос, повышается скорость роста блока льда. С ростом d_u увеличивается абсолютная производительность кристаллизатора по льду /кг/, однако, для меньших значений t_u характерна более высокая удельная производительность /рис.3а/.

3. Степень повышения концентрации раствора определяется двумя факторами: соотношением объемов образовавшегося блока и объема раствора и температурой t_u /рис.3б/. Чем ниже значение t_u , тем большим требуется объем блока, чтобы добиться нужной степени

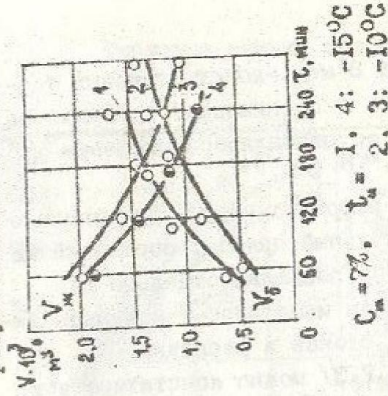


1	2	3	4	5	6	7	8
$d_u, мм$	18	10	17	17	17	17	17
$t_{up}, °C$	-15	-10	-15	-15	-15	-10	-15
$C_m, \%$	7	7	7	14	23.5	7	15

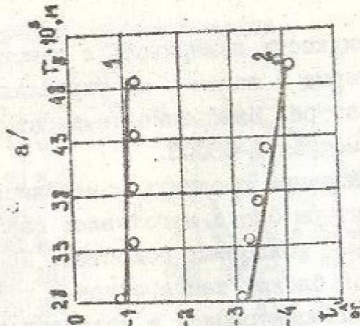


1	2	3	4	5	6	7	8
$d_u, мм$	17	17	17	17	17	17	25
$t_{up}, °C$	-10	-15	-10	-15	-10	-15	-20
$C_m, \%$	7	7	14	14	23.5	23.5	7

Рис.3



$C_m = 7\%$, $t_u = 2, 3: -10°C$
 $1, 4: -15°C$



$t_u = -10°C$; $C_m: 1-7\%$
 $2-21\%$

Рис.4

повышения концентрации сыворотки.

4. Качество разделения раствора тем выше, чем выше температура кристаллизатора /рис.3б/. Это естественный вывод, поскольку при бесконечно малой движущей силе произойдет формирование блока без наличия неводных компонентов. В этих условиях процесс разделения приближается к идеальному.

5. В процессе гравитационного сепарирования блока можно выделить 3 этапа. На первом этапе /его продолжительность 10...15 мин./ происходит стекание продукта с наружной поверхности блока. Его концентрация на /2...3/ % превышала концентрацию раствора для данного момента времени. Это позволяет предположить, что средняя концентрация пограничного слоя на /2...3/ % выше, чем средняя концентрация в растворе. Второй период времени / $\tau > 15$ мин/ характеризуется ростом концентрации стоков, порядка на /6...10/ % /рис.2в/. Это объясняется тем, что к стокам с наружной поверхности добавляются стоки с внутренней пористой области, имеющей более низкую температуру и соответствующую этой температуре криоскопическую концентрацию жидкости в порах. В третий период наблюдается монотонное уменьшение концентрации стоков, поскольку происходит повышение температуры в блоке, что сопровождается таянием некоторого количества льда. Чем выше температура окружающей среды, тем круче понижается концентрация стоков /рис.2в/. Продолжительность второго и третьего этапов определяется температурой окружающей среды. В процессе гравитационного сепарирования можно добиться разделения без практической потери неводных компонентов со льдом.

При исследовании кинетики намораживания блока получено 98 точек, которые отличались $C_m, t_m, t_u, d_u, d_k, h_A, \tau$. Обработка всех опытных данных проведена на ПЭВМ по стандартной программе. Критериальная зависимость для эффективного коэффициента массоотдачи имеет вид:

$$Sh = 3.39 Ra^{0.8} [Sc/Pr]^{1/3} \cdot K^{1.51} \quad / 7 /$$

В четвертой главе предложены принципиальные технологические схемы концентраторов со стержневыми кристаллизаторами. В качестве последних рассмотрены трубки Фильда, испарители со сложной внутренней вставкой. Показано преимущество, в некоторых случаях, двухфазных термосифонов. Универсальность ТС позволяет использовать их в аппаратах периодического и непрерывного действия, в системах

Совпадение t_a с опытными точками в пределах 5%, C_m - 10%/рис.4/.

На основе разработанной программы построена номограмма /рис.5/, связывающая Γ_g с различным сочетанием t_u , C_m , d_u , d_k , h_a , τ .

Номограмма позволяет оперативно провести экспресс-оценку технологических вариантов, выбрать рациональный диапазон параметров, вписаться в технологический регламент.

ВЫВОДЫ

1. Снижение суммарной величины термического сопротивления процессов теплопередачи от жидкого продукта через блок льда к поверхности стержневого кристаллизатора обеспечивается при $\Gamma_g < \Gamma_{кр}$. Максимальные значения плотности теплового потока достигаются при размерах блока, равных $\Gamma_{кр}$, т.е. при $Bi = 1$ /рис.1/.

2. Расчет интенсивности массоотдачи в процессе кристаллизации воды из молочной сыворотки на охлаждаемых стержневых поверхностях можно проводить по соотношению /7/.

3. Структура блока определяется температурой поверхности t_u и начальной концентрацией продукта C_m . Повышение C_m ведет к увеличению пористости, снижение t_u к ее уменьшению.

4. При постоянной температуре поверхности кристаллизатора концентрация неводных компонентов по радиусу блока снижается /несмотря на повышение при этом концентрации продукта/. Концентрация жидкости в порах блока определяется криоскопическими условиями, соответствующими температурам конкретного слоя блока.

5. Определяющее влияние на качество разделения раствора и на интенсивность вымораживания имеет температура поверхности. С понижением t_u интенсивность вымораживания растет, а качество разделения ухудшается /рис. 36/.

6. Степень повышения концентрации продукта резко возрастает с приближением объема блока к объему жидкости. При одних и тех же отношениях этих объемов более высоким t_u соответствует большая степень повышения концентрации продукта. Концентрация раствора и геометрия аппарата практического влияния не оказывает /рис.36/.

7. Формирование блока на стадии кристаллизации позволяет осуществить гравитационное сепарирование блока. Концентрация стоков определяется начальной концентрацией продукта, температурой среды, в которой находится блок, температурой в слоях блока /рис. 2в/.

8. Гидромеханика гравитационного сепарирования включает 3

этапа, которые характеризуются: 1 - постоянством; 2 - ростом и 3 - снижением концентрации стоков. Механизм процесса объясняется стоками на 1 этапе - жидкости с наружной поверхности блока, имеющей концентрацию пограничного слоя, на 2 - жидкости из пористой системы блока, на 3 - смесью продукта и расплава льда /рис.2в/.

Методом гравитационного сепарирования можно обеспечить разделение без практической потери неводных компонентов.

9. Разработанная программа /рис. 5/ позволяет оперативно получить экспресс-оценку параметров процесса концентрирования молочной сыворотки для различных сочетаний C_m , t_u , d_u , d_k , h_a , τ .

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Бурдо О.Г., Вискалова И.М., Аль-згул-Бассам. Тепломассоперенос в процессах разделения пищевых жидкостей методом блочного вымораживания. //Тез. докл. 53 науч. конф. ОТИШ им. М.В. Ломоносова. - /20-23 апр. 1993 г. - Одесса. 1993. - С.224.
2. Бурдо О.Г., Вискалова И.М., Аль-згул-Бассам. Массоперенос у процессах розділення харчових рідин методом виморожування. //Тез. док. Міжн. наук.-техн. конф. "Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробну галузі АПК". /19-21 квіт. 1993 р. - Київ. 1993. - С.571.
3. Бурдо О.Г., Аль-згул-Бассам. Термодинамические аспекты концентрирования при блочном вымораживании растворителя. //Тез. докл. 54 науч. конф. ОТИШ им. М.В. Ломоносова. - /19-24 апр. 1994г. - Одесса. 1994. - 42. - С.62.
4. Гамолич В.Я., Аль-згул-Бассам. Переходная двухфазная зона в процессе криоконцентрирования пищевых жидкостей. //Тез. докл. 54 науч. конф. ОТИШ им. М.В. Ломоносова. - /19-24 апр. 1994г. - Одесса. 1994. - 42. - С.65.
5. Аль-згул-Бассам. Экспериментальные исследования процесса разделения пищевых жидкостей методом блочного вымораживания. //Тез. докл. 54 науч. конф. ОТИШ им. М.В. Ломоносова. - /19-24 апр. 1994г. - Одесса. 1994. - 42. - С.67.

Условные обозначения

β - коэффициент массоотдачи; ϵ - пористость; λ - коэффициент теплопроводности; ν - коэффициент вязкости; ρ - плотность; τ - время; α - коэффициент температуропроводности; C - концентрация невод-

ных компонентов; d - диаметр; D - коэффициент диффузии; h - высота; F - площадь поверхности; Q - тепловой поток; q - удельный тепловой поток; R - термическое сопротивление; r - радиус; t - температура; V - объем; X - влагосодержание; M - массовый расход;

Индексы: S - насыщение; δ - блок; ж - жидкость; и - испаритель; К - концентратор; кр - криоскопический; Кт - критический; Л - лед; С - окружающая среда.

Аль-згул Бассам. Тепломасоперенос при концентруванні молочної сироватки методом блочного виморожування.

Дисертація на присудження вченого ступеню кандидата технічних наук за фахом 05.18.12 - процеси, машини та агрегати харчових виробництв, Одеська академія харчових технологій, Одеса, 1994.

В роботі показано, що формування блока льоду на стержневих кристалізаторах дозволяє: отримати льод з меншою пористістю і спростити технологію, застосувавши гравітаційне сепарування, зменшити термічний опір теплопередачі під час росту блока льоду. Експериментально встановлені залежності кінетики росту блока льоду, його структури, характеристик концентруючої сироватки від конструктивних і технологічних параметрів. Розроблені схеми апаратів та методики їх розрахунку, які використані під час проектування експериментального зразку криоконцентратора.

Ключові слова:

концентрування виморожуванням, молочна сироватка, тепломасоперенос.

AL-ZEGHOUL-BASAM. Heat and mass transfer at whey concentrating by means of bulk freezing.

A thesis for Master of technical Sciences, speciality 05.18.12 - processes, machines and apparatus of food industry, Odessa State Academy of Food Technology, Odessa, 1994.

It is established that the application of rod crystallizers makes it possible: to obtain less porous ice, to simplify the technology using gravitational separation, to reduce thermal resistance during ice growth. The connections between the kinetics of ice growth, its structure, the features of the concentrated whey and the technological parameters are ascertained and investigated. Apparatus charts and design techniques are developed.

Key words:

concentration by freezing, whey, heat mass transfer.

г.Одесса, роталпринт ОГАПТ. Подписано к печати 13.09.94
Объем 1,0 п.л. Тираж 100. Заказ 863.

✓ 017125

