ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

На правах рукописи

БРЕДИХИН АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОТОЧНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛАКТОЗЫ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук
Червецов В.В.

Москва 2015

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
Введение		3
Глава 1	**Анализ литературных источников**	8
1.1	Молочная сыворотка как объект исследования кристаллизации лактозы	8
1.2	Анализ основных теорий кристаллообразования	13
1.3	Закономерности, влияющие на процесс кристаллизации	16
1.4	Аппараты для кристаллизации	26
Глава 2	**Методология экспериментальных исследований**	30
2.1.	Методологический подход к выполнению исследований	31
2.2.	Объекты и методы исследований, приборное обеспечение	33
2.3.	Методы математического моделирования и статистической обработки экспериментальных данных	34
Глава 3	**Аналитическое исследование закономерностей теплообмена при кристаллизации лактозы молочной сыворотки в потоке**	35
3.1	Особенности теплообмена при кристаллизации лактозы молочной сыворотки в потоке	35
3.2.	Аналитическое исследование изменения температуры охлаждения сгущённой молочной сыворотки при кристаллизации лактозы	39
Глава 4	**Анализ экспериментальных исследований закономерностей теплообмена при кристаллизации лактозы молочной сыворотки в потоке**	53
4.1.	Структура, организация и объект исследования	53
4.2.	Техника и методика проведения экспериментальных исследований	55
4.3.	Методика обработки экспериментальных данных исследований	58
4.4.	Результаты экспериментов	61
Глава 5	**Практическая реализация результатов исследования**	69
5.1	Методика инженерного расчёта пластинчатого скребкового теплообменного аппарата для кристаллизации лактозы при охлаждении сгущенной молочной сыворотки	69
5.2	Пример инженерного расчёта	74
5.3.	Результат практической реализации исследования	88
	Основные результаты и выводы	97
	Список использованной литературы	98
	Приложения	109

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Кристаллизация лактозы является важнейшим технологическим процессом переработки сухой молочной сыворотки. Увеличение объёмов переработки сухой молочной сыворотки и получения лактозы в виде промышленного продукта – молочного сахара и его производных повышает актуальность исследований, направленных на изучение процесса кристаллизации лактозы.

В настоящее время кристаллизацию лактозы в молочной сыворотке проводят в основном в аппаратах периодического действия. Это снижает качество процесса кристаллизации, обусловленное отсутствием автоматизации, управляемости и обеспечения однородной дисперсности кристаллов. Техническая реализация кристаллизации в аппаратах непрерывного действия позволяет добиваться устранения большей части этих недостатков.

Поточная кристаллизация лактозы в сгущенной молочной сыворотке развивается в сложных гидродинамических условиях и широком температурном диапазоне. Реализация кристаллизации лактозы молочной сыворотки в аппаратах непрерывного действия позволяет сократить энергозатраты, уменьшить производственные площади и металлоемкость используемого оборудования периодического действия, получить однородные кристаллы, размер которых в 3-4 раза меньше, чем при кристаллизации в аппаратах периодического действия.

Благодаря аналитическим и экспериментальным исследованиям, выполненным Гнездиловой А.И., Евдокимовым И.А., Кивенко С.В., Полянским К.К., Страховым В.В., Фиалковым А.Н., Фиалковой Е.А., Червецовым В.В., Храмцовым А.Г., Гиббсом Д., Кюри П., Pepples M.L., Spreer E., Walstra P. и другими разработаны научные основы кристаллизации лактозы в лактозосодержащем сырье и концепция создания технологии переработки лактозы.

Вместе с тем, сложность явлений, протекающих при кристаллизации лактозы в молочной сыворотке, и недостаточность по этой причине полноты и чёткости физических представлений о механизме переноса теплоты при кристаллизации,

затрудняет его аналитическое описание, создание обобщённой теории и совершенствование процесса. До настоящего времени недостаточно изучены кинетические закономерности охлаждения молочной сыворотки при поточной кристаллизации в ней лактозы с учётом изменяющихся вязкостных свойств при увеличении массовой доле сухих веществ. Отсутствуют данные о влиянии гидродинамики в аппарате и температуры нагревания молочной сыворотки на количество образующихся кристаллов лактозы и их средний размер. Нет единого подхода к анализу механизма передачи теплоты при кристаллизации, недостаточное развитие получило аналитическое описание закономерностей внутреннего переноса теплоты и др. Изложенное свидетельствует о необходимости дальнейшей разработки и развитии теоретических и экспериментальных положений и закономерностей процесса поточной кристаллизации лактозы в молочной сыворотке.

Диссертационная работа выполнялась в период 2012-2015 г. в Федеральном государственном научном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (ФГБНУ «ВНИМИ») в рамках бюджетных и хоздоговорных тематик и является дальнейшим продолжением и развитием теоретических и экспериментальных исследований, проводимых лабораторией молочных консервов института.

Целью работы является разработка поточного процесса кристаллизации лактозы в пластинчатом скребковом теплообменном аппарате на основе кинетики температурных изменений сгущённой молочной сыворотки.

Для достижения поставленной цели были поставлены и последовательно решены следующие задачи:

– провести анализ физико-химических явлений тепломассообмена при кристаллизации лактозы в потоке с учётом вязкостных свойств сгущённой молочной сыворотки;

– разработать математическую модель переноса теплоты в потоке при осесимметричном распределении температуры в сгущённой молочной сыворотке без учета диссипации энергии при кристаллизации в ней лактозы;

– исследовать закономерности изменения температуры массовой кристаллизации лактозы и определить количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние;

– определить влияние частоты вращения рабочих органов роторно-пульсационного аппарата (далее РПА) на количество образующихся кристаллов лактозы и их средний размер;

– установить влияние температуры нагревания на средний размер кристаллов лактозы;

– разработать инженерную методику расчёта пластинчатого скребкового теплообменника непрерывного действия для кристаллизации лактозы молочной сыворотки на основе кинетики её температурных изменений;

Научная новизна выражается в:

– разработанной математической модели переноса теплоты в потоке при осесимметричном распределении температуры, без учета диссипации энергии и получении выражения, позволяющего определять температуру движущейся сгущённой молочной сыворотки при кристаллизации в ней лактозы;

– получении новых знаний об изменении температуры массовой кристаллизации лактозы молочной сыворотки в зависимости от содержания в ней сухих веществ и влиянии гидродинамического воздействия на количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние;

– установленных экспериментальных закономерностях влияния температуры охлаждения и частоты вращения рабочих органов РПА на количество образующихся кристаллов лактозы и их средний размер.

Научные положения, выносимые на защиту. Формой реализации поставленных в работе задач являются следующие научные положения, защищаемые в диссертации:

– разработанная математическая модель переноса теплоты в потоке при осесимметричном распределении температуры, без учета диссипации энергии и с учётом вязкостных свойств сгущённой молочной сыворотки при кристаллизации в ней лактозы;

– экспериментальные данные по температуре массовой кристаллизации лактозы молочной сыворотки при различном содержании в ней сухих веществ и количеству лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние;

– закономерности влияния частоты вращения рабочих органов РПА на количество образующихся кристаллов лактозы и их средний размер;

– инженерная методика расчёта пластинчатого скребкового теплообменника непрерывного действия при кристаллизации лактозы молочной сыворотки на основе кинетики её температурных изменений.

Практическая значимость работы. Научные исследования нашли применение в разработанной инженерной методике расчёта скребкового теплообменника непрерывного действия при кристаллизации лактозы молочной сыворотки на основе кинетики её температурных изменений, которая была апробирована и реализована в скребковом теплообменнике непрерывного действия, испытанном в ОАО «Учебно-опытный молочный завод» ВГМХА им. Н.В. Верещагина».

Методика инженерная расчёта скребкового теплообменника непрерывного действия передана в ФГУП «Молмаш» ФАНО России для использования при разработке и модернизации соответствующего оборудования.

Полученные в диссертационной работе результаты теоретических и экспериментальных исследований реализованы в учебном процессе при проведении лекционных, практических занятий, курсовом и дипломном проектировании при подготовке студентов ФГБОУ ВПО МГУПП специальности 260601.65 «Машины и аппараты пищевых производств» и направлениям подготовки 151000.62 (уровень бакалавриата) и 151000.68 (уровень магистратуры).

Проведены аналитические исследования гидродинамических и массообменных процессов в пластинчатом скребковом теплообменнике при исследовании процесса поточной кристаллизации лактозы в молочной сыворотке.

Апробация работы. Основные результаты исследований по теме диссертации доложены и обсуждены на конференциях и семинарах различного

уровня; Международная научно-техническая конференция «Адаптация ведущих технологических процессов к пищевым машинным технологиям, Воронеж – 2012; X Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Живые системы и биологическая безопасность населения», Москва – 2012; VI Международная научно-практическая конференция «Технология и продукты здорового питания», Москва – 2012; Международная научно-техническая конференция «Производство продуктов для здоровья человека – как составная часть наук о жизни», Воронеж – 2012; Всероссийская научно-практическая конференция «Новые технологии и оборудование - основа успеха работы молочной промышленности в условиях ВТО», Адлер – 2012; Всероссийская юбилейная научная конференция, посвященная 125-летию со дня рождения академика Н.И. Вавилова «Научное наследие Н.И. Вавилова и современность», Москва – 2013;

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, в том числе одно учебное пособие, 7 в печатных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложений. Основной текст изложен на 96 страницах машинописного текста, содержит: 5 таблиц, 25 рисунков. Список литературы включает 138 наименований.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1.1. Молочная сыворотка как объект исследования кристаллизации лактозы

Молочная сыворотка является уникальным и очень важным сырьевым компонентом, образующимся в результате переработки молока при производстве творога, сыра, казеина. В качестве сырья для производства сыворотки молочной используется сыворотка, которая образуется при производстве творога и сыра [87]. В зависимости от того какой продукт вырабатывают, получают подсырную, творожную и казеиновую сыворотку [85, 67, 16, 87].

О молочной сыворотке человечество узнало еще в древние времена, одновременно с появлением продуктов типа творога и сыра. Можно выделить четыре основных исторических этапа по совершенствованию процессов переработки молочной сыворотки [87,86,84,16].

1. В глубокой древности человек уже знал процессы получения творога и сыра, примерно 6,5-5 тысячелетий до н.э. Скорее всего, получаемая творожная и подсырная сыворотка использовалась в пищу в натуральном виде.
2. Во времена средневековья объемы производства творога и сыра увеличились, что привело к росту объемов получаемой сыворотки. Её начали использовать в лечебных целях, как диетическое питание больным, страдающим ожирением. В основном сыворотку применяли в тесто при выпечке хлебных изделий, определенная часть уходила на корм домашним животным.
3. Во второй половине XIX в. и первой половине XX в. все производство творога и сыра начало концентрироваться в городах на молочных и сыродельных заводах. В этот период началось производство казеина и появление казеиновой сыворотки. Возникла проблема использования молочной сыворотки, в связи со значительным ростом ее получаемых объемов. Помимо прежнего ее использования, добавилась переработка молочной сыворотки на молочную кислоту, молочный сахар, деминерализованную сухую сыворотку. Началась

организация производства напитков из сыворотки, некоторых продуктов питания, использования сыворотки в хлебопечении, а также в диетическом питании и в лечебных целях. Но при этом появились первые признаки отрицательного влияния молочной сыворотки на окружающую среду в связи с неорганизованным сбрасыванием ее в сточные воды.

4. Во второй половине XX в. всё производство творога, казеина и сыров сосредоточилось на крупных специализированных предприятиях. В связи с этим возросли объемы получаемой молочной сыворотки [87].

В настоящее время молочную сыворотку используют для получения сгущенных и сухих концентратов, выделения сывороточных белков, производства молочного сахара, спирта, хлебобулочных изделий, а также в производстве кормов. В профилактических и лечебных целях, в производстве парфюмерии из молочной сыворотки извлекают отдельные компоненты [87].

По всему миру проведено большое количество научно-исследовательских работ по изучению технологических процессов переработки молочной сыворотки и их технической реализации [87,86,84,16,25,27].

Состав и свойства молочной сыворотки обусловлены видом основного продукта (творога, сыра, казеина и т. д.) и особенностями технологии его получения, а также аппаратурным оформлением процесса. Данные по составу и свойствам молочной сыворотки приведены в таблице 1.1 [87].

Таблица 1.1

№	Компоненты	г/100 мл	%
1	Лактоза	4,66	71,7
2	Белковые вещества	0,91	14,0
3	Минеральные вещества	0,50	7,7
4	Жир	0,37	5,7
5	Прочие	0,06	0,9
	Итого	6,50	100

Основные физико-химические показатели молочной сыворотки представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2.

№	Показатели		Единицы измерения	Пределы значений
1	Плотность		кг/м^3	1018-1027
2	Вязкость динамическая		мПа·с	1,51-2,58
3	Кислотность	титруемая	°Т	10-120
		активная	ед. pH	4,3-6,3
4	Буферная емкость	по кислоте	мл^3	1,72
		по щелочи	мл^3	2,32
5	Оптическая плотность 1% раствора		усл. ед.	0,259
6	Мутность		м$^{-1}$·10^2	0,15-0,26
7	Коэффициент рефракции света		усл. ед.	1,342-1,351
8	Температура	кипения	°С	101,5-102,2
		замерзания	°С	(-0,6)-(-0,72)
9	Удельная теплоемкость		кДж/кг·К	3,98-4,81
10	Поверхностное натяжение		мН/м	40-52
11	Осмотическое давление		МПа	0,61-0,89
12	Теплопроводность		Вт/м·°К	0,540
13	Температуропроводность		(м^2/с)·10^8	12,8

При производстве творога, сыра, казеина в молочную сыворотку переходит около 50 % сухих веществ молока, в том числе большая часть различных минеральных веществ и 36% лактозы [34]. Лактоза составляет большую часть объема молочной сыворотки, ее массовая доля составляет около 70 % сухих веществ. В связи с этим молочную сыворотку используют для промышленного получения молочного сахара, а также для выработки сухих и сгущенных

продуктов, таких например, как молочная сгущенная сыворотка, деминерализованная сухая сыворотка, молочная сухая сыворотка. В молочную сыворотку переходят практически все соли и микроэлементы молока, а также водорастворимые витамины.

Молочная сыворотка – это истинный раствор, который получается после удаления жира и белков из молока. Истинный раствор представляет собой гомогенную смесь, состоящую из растворенных веществ и растворителя [87].

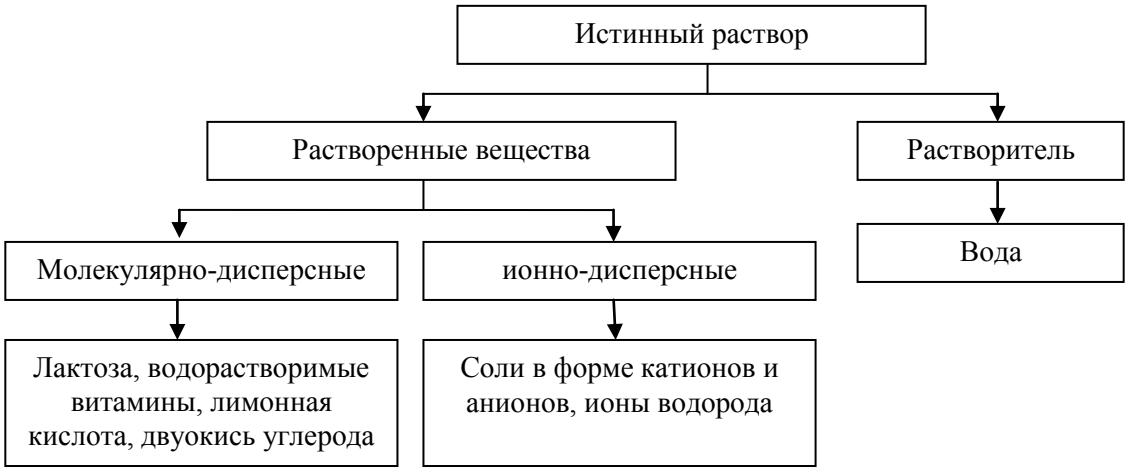


Рис. 1.1. Молочная сыворотка как истинный раствор

В сыворотке содержится большое количество воды, около 93,7 %, и это значительно ограничивает применение натуральной сыворотки. Вследствие этого на предприятиях сыворотку подвергают различной обработке с целью выделить отдельные составные части (жир, белки, молочный сахар) или повысить в ней содержание сухих веществ.

Для переработки молочной сыворотки используют различные технологии и способы обработки, в основном – это процесс кристаллизации лактозы, который в значительной мере определяет качество готового продукта.

Одним из растворённых компонентов в молочной сыворотке является лактоза. Лактоза в кристаллическом виде ценное вещество, широко используемое в детском питании, кондитерском и хлебопекарном производстве, спортивном питании и т.д. [87,85,67,16,91].

Сгущенную сыворотку, выходящую из вакуум-выпарного аппарата, охлаждают до температуры массовой кристаллизации лактозы (30-35 °С) и направляют на кристаллизацию. Лактоза в аморфном состоянии очень гигроскопична, труднее отдает влагу и в то же время легче ее поглощает. Этим объясняются трудности при сушке и хранении сыворотки. При неблагоприятных условиях хранения начинается поглощение ею влаги, которое продолжается до достижения равновесия с влажностью окружающей среды, при этом содержание влаги может достичь 30 %. В результате порошок размягчается, происходит спекание частиц, материал теряет структурную устойчивость. Наличие кристаллов лактозы может приостановить процесс поглощения влаги, так как гигроскопичность порошка при этом резко снижается. Чем больше лактозы из аморфной формы переведено в кристаллическую форму, тем меньшей гигроскопичностью и спекаемостью будет обладать готовый продукт.

В зависимости от способа производства сухой сыворотки, сгущенная сыворотка поступает на кристаллизацию лактозы или на сушку. Для кристаллизации лактозы сгущенную сыворотку подвергают первичному охлаждению и подают в кристаллизаторы, куда вносят затравку мелкокристаллического молочного сахара (размеры кристаллов 5-20 мкм) [87]. Режимы кристаллизации молочной сыворотки приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3.

Технологическая операция	Сыворотка	
	подсырная	творожная
Первичное охлаждение, °С	28-30	30-32
Количество внесенной затравки, % от массы сгущенной сыворотки	0,02	0,02
Продолжительность выдержки при температуре первичного охлаждения, ч	2	2
Продолжительность постепенного охлаждения сгущенной сыворотки, ч	8-10	6
Конечная температура охлаждения, °С	15-18	20-22

Желательный размер кристаллов в концентрате сгущённой молочной сыворотки – 20-30 мкм. Сухая сыворотка, содержащая лактозу в виде мелких кристаллов, равномерно распределенных внутри частиц, будет меньше спекаться. При сушке молочной сыворотки с предварительно кристаллизованной лактозой в сушильной камере образуется меньше отложений порошка, готовый продукт обладает хорошей сыпучестью, низкой гигроскопичностью и не слеживается при хранении [84].

1.2. Анализ основных теорий кристаллообразования

Выделение твердых веществ в виде кристаллов в твердых, расплавленных или парообразных средах происходит путем процесса кристаллизации. Процесс кристаллизации представляет собой массообменный процесс, при котором выделяются твердые вещества, находящиеся в жидкой среде. Кристаллизация представляет собой процесс фазового перехода вещества в твердое кристаллическое состояние из жидкого состояния.

Кристаллизацию условно можно разделить на изотермическую, проходящую при постоянной температуре кипения, изогидрическую, проходящую при постоянстве количества растворителя и изотермически-изогидрическую, когда внешней подпиткой раствора компенсируется убыль раствора. В реальности в кристаллизующейся массе наблюдаются нерегулируемые поля [90, 91,93,100,116].

Д. Гиббс и П. Кюри являются основоположниками в области кристаллизации со своей термодинамической теорией фазообразования [20,46,51]. Данная теория предполагает два основных положения:

– определение формы кристалла зависит от наименьшего значения поверхностной энергии;

– за счет появления новых плоскостей кристаллизации, вследствие образования двумерных зародышей, происходит рост кристалла [68,63].

В дальнейшем термодинамическая теория получила свое развитие в работе Ю. Вульфа [19]. В данной работе выдвигаются положения из принципа Гиббса-

Кюри-Вульфа, в котором описано, что скорость роста грани кристалла пропорциональна к ее поверхностной энергии [92,124]. При этом, используя правило А. Браве о ретикулярной плотности кристалла и обратной пропорциональности поверхностной энергии, Ю. Вульф пришел к заключению, что в процессе роста кристалла остаются только грани, которые обладают ретикулярной плотностью [117].

В дальнейшем при экспериментальном исследовании роста кристаллов ртути М. Фольмер [81, 121,126] пришел к выводу, что адсорбирующиеся молекулы на поверхности кристалла, теряют только небольшую часть своей энергии и в таком состоянии могут присоединиться к кристаллической решетке, либо перейти в раствор. Определение быстроты роста кристаллов происходит благодаря скорости перехода частиц в кристаллическую решетку из адсорбционного слоя. Частицы, соударяясь между собой при процессе движения вдоль поверхности кристаллизирующегося вещества, создают двумерные зародыши, которые при увеличении создают новый кристаллический слой. Вследствие этого рост кристалла определяется процессом образования двумерных зародышей. Это также является одной из разновидностей теории адсорбционного слоя Х. Брандеса [4]. Только при малых движущих силах раствора, уравнения, которые получил М. Фольмер, согласуются с экспериментом.

На основе теорий М. Фольмера и Х.Брандеса получили свое развитие дислокационная и молекулярно-кинетическая теории роста кристаллов [138].

В случае невозможности применения термодинамических условий, когда путем послойного разрастания граней не происходит рост кристаллов, для обоснования кристаллообразования лучше всего обратится к молекулярно-кинетической теории, которую изложили в своих работах И. Странский [38], Р. Каишев [75] и В. Коссель [117, 118]. Данная теория основывается на принципе минимума свободной энергии, которая учитывает в себе энергию присоединения или отрыва единичных элементарных масс, распределенных в различных положениях на поверхности кристалла.

Из исследований В. Косселя [120] по изучению роста идеальных кристаллов видно, что процесс роста кристаллов является прерывистым процессом и напрямую связан с периодом образования нового плоского зародыша. Также В. Коссель в своих работах указывает на то, что для гетерополярного кристалла наиболее вероятен рост с области ребер и углов, а для гомеополярного – с середины грани. Опираясь на работы В. Косселя, С. Рогинский [63] определил, что только для гомеополярного кристалла зависимость скорости роста кристалла от его размера прямо пропорциональна скорости роста кристалла. Данное заключение нашло свое экспериментальное подтверждение в работах К. Полянского и А. Шестова[57,58,91].

Молекулярно-кинетическая теория не может дать объяснение результатам исследований, в которых толщина слоев кристаллов достигает несколько сотых долей миллиметра, т.е. в несколько тысяч раз превышает толщину одного слоя [126,138].

Дислокация является одним из дефектов в реальных кристаллах, создающая неуничтожимые кромки роста. Дислокационная теория основывается на наличии неуничтожимых кромок роста в области дефектов реальных кристаллов и предполагает наличие избыточной энергии в этой области, которая образуется вследствие энергий оборванных и искаженных связей в центре дислокаций. Исследованию данной теории посвятили свои работы Н. Альбон, О. Козлова и В. Даннинг [117,136,137].

Диффузионная теория, которая была экспериментально подтверждена Р. Марком и Х. Майерсом [26,123] возникла почти одновременно с термодинамической теорией. Данная теория предполагает, что грани различного типа имеют различную толщину диффузионного слоя, и вследствие этого различную растворимость, в связи, с чем и определяется различная скорость роста граней кристалла [77-79,115].

В соответствии с диффузионной теорией процесс кристаллизации разделён на два этапа: отложение кристаллизирующегося вещества и диффузия молекул из

глубины раствора к поверхности. Каждый из этапов зависит от концентрации раствора [4,6,26,35,80].

С другой стороны исследования А. Шестова и К. Полянского показывают, что реакция муторации влияет на особенность роста кристаллов [58]. Наличие реакции муторации в совокупности с процессами адсорбции, поверхностной диффузией и дегидратации оценивается коэффициентом поверхностной диффузии и как ведущий этап в процессе роста кристаллов определяет кристаллохимическую реакцию.

Изучение исследований А. Гнездиловой показало, что с увеличением размера кристаллов увеличивается их скорость роста [27]. Также авторы рассматривают кристаллохимическую стадию как двухстадийный процесс, который включает в себя встраивание диффузии молекул в кристаллическую решетку.

А. Гнездилова и В. Перелыгин провели исследования процесса зародышеобразования как в чистых пересыщенных водных растворах лактозы и сахарозы, так и в присутствии в них примесей. Вследствие разработанной модели был раскрыт механизм влияния разных факторов на процесс зародышеобразования [26]. На основе изложенной модели, если регулировать процессы зародышеобразования и роста кристаллов, то возможно получить нужные размеры кристаллов.

Проведенный анализ литературных источников показывает,что в настоящее время отсутствует единый теоретический подход в изучении закономерностей процесса кристаллизации. В связи с этим изучение и экспериментальное исследование кристаллизации лактозы из молочной сыворотки является актуальным и представляет собой значительный теоретический и практический интерес.

1.3. Закономерности процесса кристаллизации

Кристаллизация из растворов представляет собой сложный процесс, состоящий из взаимосвязанных и взаимовлияющих физических явлений

образования и роста кристаллов. Стадии образования центров кристаллизации (зародышей кристаллов) и их последующего роста могут протекать одновременно или последовательно [14].

Кристаллы представляют собой твердые тела различной геометрической формы, ограниченные плоскими гранями. Форма, внутреннее строение и состав компонентов кристаллов зависит от химической природы и состава компонентов расплава или раствора. Химический состав кристаллов отличается от состава раствора или расплава. Это свойство кристаллов используют для разделения компонентов растворов и расплавов веществ путем их кристаллизации [37, 16].

Изучению процесса массовой кристаллизации в жидких средах посвящены многие исследования [5,27,85, 67,25, 83,23].

Продуктами кристаллизации являются масса кристаллов (кристаллизат) и обедненный раствор (межкристальная жидкость). Температура кристаллизации вещества в смеси с другими компонентами в виде расплава или раствора зависит от состава этой смеси. Процесс кристаллизации сопровождается выделением теплоты [37, 14].

Зарождение кристаллов происходит в центрах кристаллизации,которые представляют собой минимальные ассоциации молекул растворенных веществ, возникающие при случайных столкновениях в ходе хаотического теплового движения. Они образуются самопроизвольно только при достижении определенной степени пересыщения растворов. Ими могут быть также механические примеси, шероховатость поверхности аппаратов и другие случайные факторы. В качестве центров кристаллизации и, с целью уменьшения или исключения отложения кристаллов на внутренних поверхностях аппаратов, в раствор подают мелкие частицы раздробленных кристаллов. Эти частицы обеспечивают образование большого количества центров кристаллизации без значительного пересыщения растворов, вследствие чего процесс ускоряется. В промышленных условиях процесс кристаллизации состоит из следующих технологических операции: собственно кристаллизации, отделения кристаллов от

маточного раствора, промывки и сушки кристаллов. Раствор, оставшийся после выделения из него кристаллов, называют маточным [16].

Начало процесса кристаллизации достигается при выполнении определенного условия. Например, при переохлаждении пересыщенных растворов, когда практически мгновенно возникает множество центров кристаллизации – мелких кристаллов. В ходе роста кристаллов к ним присоединяются атомы или молекулы из жидкости. Грани кристалла растут послойно, т.е. края незавершённых атомных слоев (ступени) при росте движутся вдоль грани. Такое разнообразие структуры и форм роста (многогранные, пластинчатые, игольчатые, скелетные, дендритные и другие формы, карандашные структуры и т. д.) кристаллов происходит от зависимости скорости роста от условий кристаллизации. В процессе кристаллизации неизбежно возникают различные дефекты [37, 70, 16, 27, 87, 63,57].

Концентрация растворенного вещества в растворе, который находится в равновесии с кристаллическим веществом при определенной температуре, называется растворимостью. Такой раствор является насыщенным [5,27,82].

Насыщенный раствор является устойчивым, если в нем не растворяются кристаллы и не выделяются растворенное вещество. Ненасыщенный раствор растворяет кристаллы до тех пор, пока он не станет насыщенным и он содержит растворенное вещество в количестве, меньше растворимости [14].

Пересыщение раствора является одним из главных условий протекания процесса кристаллизации. Раствор называется пересыщенным, если в нем содержание вещества в растворенном виде превышает растворимость [67]. При высоком пересыщении раствора наблюдается интенсивное срастание кристаллов [8]. Различные исследования показали, что пересыщение оказывает влияние на размер кристаллов, т.к. в данном случае скорость зародышеобразования опережает скорость роста, но его влияние практически исключается при высоких пересыщениях, т.к. наблюдается интенсивное срастание кристаллов [5,27,28,50,82]. В результате исследований авторами [27,28,50,82] было

установлено, что продолжительность индукционного периода уменьшается с увеличением степени пересыщения.

Коэффициент пересыщения k_n характеризует степень отклонения от насыщенного состояния. Данный коэффициент представляет собой отношение содержания растворённого вещества $B_в$ данном растворе к растворимости B_0 в чистом растворителе при той же температуре

$$k_n = \frac{B}{B_0}. \qquad (1.1)$$

При $k_n < 1$ растворы ненасыщенные, при $k_n > 1$ – растворы пересыщенные. Численное значение k_n зависит от способа выражения растворимости. Предположим, если растворимость $B_0 = c_0$, где c_0 – растворимость растворённого вещества в кг/кг насыщенного раствора, то $k_n = \frac{c}{c_o}$; здесь c – массовая концентрация растворённого вещества в данном растворе, кг/кг раств.

Если же растворимость выражена как содержание растворённого вещества в насыщенном растворе $\frac{c}{W_o}$, где W_0– содержание в нём растворителя, то $k_n = \left(\frac{c}{W}\right) - \left(\frac{c_0}{W_0}\right)$, где W – содержание растворителя в данном растворе.

Твердая фаза при пересыщении растворов может выделяться не только в виде кристаллов, но и в виде аморфного осадка.

Механизм процесса кристаллизации заключается в том, что для большинства веществ с повышением температуры их растворимость увеличивается. Однако имеются некоторые вещества, растворимость которых с повышением температуры уменьшается. Растворимость вещества, увеличивающаяся с повышением температуры, называется положительной, а уменьшающаяся – отрицательной [14].

При переходе раствора пересыщенного состояния в насыщенное происходит кристаллизация (выпадение кристаллов).

Поведение растворов с изменением их температуры характеризуют диаграммы состояния растворов в координатах: концентрация c – температура T (рис.1.2). Линия 1 соответствует условиям, при которых раствор находится в равновесии с кристаллическим веществом при данной температуре, данного вещества. [14].

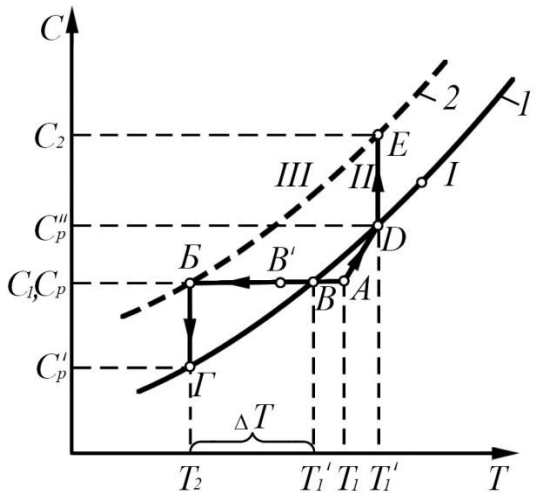


Рис. 1.2. Диаграмма состояния растворов

Область I (ниже линии насыщения 1) соответствует ненасыщенному раствору. Кристаллизация в этой области не происходит, а имеющиеся в растворе кристаллы растворяются. Линия 2 делит область пересыщенных растворов на две части. В области III кристаллизация протекает самопроизвольно, в области II растут только кристаллы, уже имеющиеся в растворе. По c, T – диаграмме проследим изменение состояния раствора при различных способах кристаллизации. Охлаждение начального насыщенного раствора с концентрацией c_1 и температурой T_1 (точка А) изобразится горизонталью АБ. Она пересекает кривую растворимости 1 в точке В, характеризующей насыщенное состояние раствора c_p при температуре T'_1. Если кристаллизация раствора начинается после охлаждения его до температуры T_2, то процесс кристаллизации изобразится вертикалью БГ, а конечная состояние раствора – точка Г на кривой растворимости, соответствующей равновесной концентрации c'_p (изогидрическая кристаллизация). При изменении температуры от T'_1 до T_2 количество выпавшей

из раствора твердой фазы пропорционально изменению концентрации раствора c_p - c'_p.

Перевод исходного раствора (точка А) в пересыщенное состояние путем частичного выпаривания растворителя происходит вначале с повышением температуры кипения раствора до T''_1 до состояния насыщения c''_p (линия AD), а затем при постоянной температуре T''_1 до достижения состояния пересыщения c_2 (линия DE), т.е. изотермическим способом. При этом из раствора выпадает часть твердой фазы, пропорциональная разности c_2 - c''_p.

Для получения однородных по размерам кристаллов прибегают к использованию так называемой затравки. Затравка – это мельчайшие частицы кристаллов или даже мельчайшие кристаллы того же вещества, которые вносятся в пересыщенный раствор. Каждая из частиц затравки представляет собой центр кристаллизации [14, 16, 70].

Например, при производстве сгущенного молока с сахаром для интенсификации кристаллизации и образования мелких кристаллов лактозы в сгущенный продукт вносят затравку – сухую мелкокристаллическую лактозу с размером кристаллов 2-3 мкм. Количество затравки соответствует 0,02 % массы продукта. Лактозу перед внесением прогревают при 105 ± 2 °С не менее 1 ч. После внесения лактозы в сгущенное молоко увеличивается число зародышей кристаллизации, которые способствуют образованию мелких кристаллов. В качестве затравки можно использовать сгущенное молоко предыдущей выработки. Температура массовой кристаллизации лактозы по разным источникам колеблется от 27 до 35 °С [14, 16].

В зависимости от назначения кристаллизации получают либо крупные, либо мелкие кристаллы. Например, мелкие кристаллы сахарозы имеют массу 0,0001 г, крупные – до 1,5 г [16].

Крупные кристаллы легко отделяются от маточного раствора. Получение мелких кристаллов необходимо при производстве сгущённого молока с сахаром. Для получения продукта высокого качества необходимо, чтобы размеры кристаллов лактозы не превышали 10 мкм. Если образуются кристаллы большего

размера, то консистенция сгущенного молока с сахаром становится мучнистой и даже песчанистой [14, 16].

О правильно проведенной кристаллизации лактозы судят по ее размерам. В соответствии с нормативной документацией однородность консистенции продукта определяют по средним размерам и распределению кристаллов по группам, а их количество – подсчетом под микроскопом с применением окуляров -микрометров. Величину кристалла измеряют по длине грани. Все кристаллы делят на 4 группы. По средней величине кристаллов в каждой группе и их количеству вычисляют средний размер кристаллов в сгущенном молоке с сахаром. При определении размеров кристаллов молочного сахара измеряют не менее 100 кристаллов. В зависимости от размеров кристаллов молочного сахара выделяют следующую консистенцию продукта: до 10 мкм - консистенция, однородная по всей массе; от 10 до 15 - мучнистая; от 16 до 25 - песчанистая; более 25 - хрустящая на зубах [16].

Общий баланс массы при кристаллизации выражают как [64]

$$m_{2н} = m_{крис} + m_{2к} + m_{р}, \qquad (1.2)$$

где $m_{2н}$, $m_{крис}$, $m_{2к}$ и $m_{р}$ – массы соответственно исходного раствора, полученных кристаллов, конечного (остаточного) раствора и удаляемого растворителя, кг (периодический процесс) или массовый расход, кг/с (непрерывный процесс).

При изотермической кристаллизации $m_{р} = 0$.

Баланс массы по кристаллизуемому веществу

$$m_{2н}c_{2н} = m_{крис}c_{крис} + m_{2к}c_{2к}, \qquad (1.3)$$

где $c_{2н}$, $c_{2к}$, $c_{крис}$ – концентрации соответственно исходного, остаточного растворов и кристаллов, массовые доли. В кристаллогидратах $c_{крис}$<100 %, в безводных кристаллах$c_{крис}$ = 100 %.

Из уравнений (1.2) и (1.3) получаем массу образовавшихся кристаллов $m_{кр}$

$$m_{крис} = [m_{2н}(c_{2к} – c_{2н}) - m_{р}c_{к}]/(c_{2к} - a). \qquad (1.4)$$

Уравнение теплового баланса в случае изотермической кристаллизации имеет вид

$$m_{1н}c_{1н}T_{1н} + m_{крис}r_{крис} + Q_{2н} = m_{крис}\partial\ell_{крис}T_к + \left(m_н + m_{крис} - m_р\right)\partial\ell_к T_к + m_р\, i_в + Q_{пот}, \quad (1.5)$$

где æ$_н$, æ$_м$, æ$_{крис}$ – теплоемкости соответственно начального раствора, остаточного раствора и кристаллов, Дж/(кг·К); $T_н$, $T_к$ – температуры, соответственно, начального и остаточного растворов, К; $r_{крис}$ – удельная теплота кристаллизации, Дж/кг; $Q_{2н}$ – приход теплоты с теплоносителем, Вт; $Q_{пот}$ – потери теплоты, Вт; $i_в$ – энтальпия вторичного пара, Дж/кг.

Если теплоносителем является насыщенный водяной пар, то приход теплоты, кг/с находят из уравнения [14]

$$Q_{2н} = m_{2н}(i_{2н} – c_{конд}T_{конд}), \quad (1.6)$$

где i – энтальпия пара, Дж/кг; $c_{конд}$ – теплоемкость конденсата, Дж/(кг К); $T_{конд}$ – температура конденсата, К. С учетом уравнения (1.4) можно определить $m_{2н}$.

Уравнение теплового баланса в случае изогидрической кристаллизации имеет вид

$$m_н\partial\ell_н T_н + m_{крис}q + m_{ох}\partial\ell_{ох}T_{ох.н} = m_{крис}\partial\ell_{крис}T_к + \left(m_н - m_{крис}\right)c_к T_к + m_{ох}\partial\ell_{ох}T_{ох.к} + Q_{пот}, \quad (1.7)$$

где $m_{ох}$ и æ$_{ох}$ – соответственно расход и теплоемкость охлаждающей жидкости, кг/с и Дж/(кг·К); $T_{ох.н}$ и $T_{ох.к}$ – соответственно начальные и конечные температуры охлаждающей жидкости, К.

Из уравнения (1.7) можно определить расход охлаждающей жидкости $m_{ох}$.

Скорость увеличения массы одного кристалла равна скорости массоотдачи растворённого распределяемого вещества поверхности кристалла $S_{крис}$. Кинетику процесса кристаллизации можно выразить в соответствии с уравнением массоотдачи [64]

$$\frac{dm}{d\tau} = \beta_2\rho_2\left(c_2 - c_{2рав}\right)S_{крис}, \quad (1.8)$$

где $m_{крис}$, $S_{крис}$ – соответственно масса, кг и площадь поверхности кристалла, м^2 в текущий момент времени; β_2 – коэффициент массоотдачи, м/с; ρ_2 – плотность жидкой фазы, кг/м^3; c_2, $c_{2рав}$ – соответственно концентрации пересыщенного

раствора и раствора у поверхности кристалла (принимается равной концентрации насыщенного раствора), доли единицы.

По мере роста кристаллов увеличивается их площадь поверхности $S_{крис}$. Кристаллы имеют форму правильных многогранников. Соотношение между площадью поверхности многогранников кристаллов $S_{кри}$ и их объемами $V_{крис}$ имеет вид [14]

$$S_{крис} = AV^{2/3}_{крис} = A(m_{крис}/\rho_{крис})^{2/3}, \quad (1.9)$$

где A- коэффициент, зависящий от формы кристалла (данные приводятся в справочной литературе в зависимости от природы вещества кристалла), например для куба A = 6; для октаэдра A = 5,716; для додекаэдра A = 0,188; $V_{крис}$- объём кристалла.

Так как $V_{крис} = m_{крис}/\rho_{крис,}$, то $S_{крис} = A\left(\frac{m_{крис}}{\rho_{крис}}\right)^{2/3}$.

После подстановки в (1.8) получим

$$\frac{dm_{крис}}{m_{крис}^{2/3}} = A\rho_{rhbc}^{-2/3}\beta_2\rho_2\left(c_2 - c_{2p}\right)d\tau, \quad (1.10)$$

где $c_2 > c_{2р}$.

Если концентрация раствора со временем не изменяется (c_2=*const*), то после интегрирования (1.10) получим зависимость массы кристалла от времени кристаллизации

$$m_{крис}^{1/3} = 0{,}33A\beta_2\rho_{крис}^{2/3}\rho_2\left(c_2 - c_{ср}\right)\tau. \quad (1.11)$$

Вследствие того что развитие процесса кристаллизации происходит в сложных гидродинамических условиях, т.е. меняющейся концентрации и вязкости раствора в широком температурном диапазоне, наличии в жидкой среде несахаров и т.п., физико-математическое описание данного процесса является весьма сложным [47,56].

Процесс кристаллизации можно рассматривать как обратный процессу растворения. Однако между ними имеется существенное различие:

– при растворении число растворяющихся частиц или не изменяется, или уменьшается, в то время как при кристаллизации число зародышей, на которых отлагается вещество, непрерывно возрастает;

– при растворении разрушение кристаллической решетки не лимитирует суммарную скорость процесса, а при кристаллизации внедрение микрочастиц в кристаллическую решетку (кристаллохимическая реакция) влияет на суммарную скорость процесса [24].

Перемешивание является фактором, оказывающим большее влияние на зародышеобразование, чем на рост. Вследствие этого перемешивание способствует образованию более мелких кристаллов [5,77].

Также важно отметить, что увеличение температуры влияет на ускорение роста кристаллов, в результате чего кристаллы, выращенные при более высокой температуре, оказываются крупнее.

Для выделения растворенного вещества в виде кристаллов необходимо довести раствор до состояния пересыщения. Пересыщенный раствор может быть получен: повышением его концентрации, охлаждением для понижения растворимости и добавлением в раствор веществ, связывающих растворитель (воду) или уменьшающих растворимость.

По первому способу концентрацию раствора повышают путем его выпаривания при постоянной температуре кипения в выпарном аппарате (если растворитель летуч) или баромембранным разделением. Этот способ называют изотермическим. По второму способу пересыщение раствора достигается охлаждением раствора при постоянном количестве растворителя. Этот способ называют изогидрическим. По третьему способу убыль растворителя из кипящей массы возмещается внешней подпиткой раствора. Этот способ называют изотермически-изогидрическим [14].

Процесс кристаллизации может проходить периодически или непрерывно. Периодическая кристаллизация экономически не выгодна и требует громоздкую

аппаратуру и больших затрат ручного труда, а также получающийся продукт в аппаратах периодического действия не всегда однороден. В аппаратах непрерывного действия наоборот достигается большая производительность и однородность продукта.

Кристаллизация с удалением части растворителя (изогидрическая или политермическая кристаллизация).Данный способ кристаллизации применяется в тех случаях, когда растворимость кристаллизуемого продукта мало изменяется с понижением температуры. Проводится путем удаления из раствора некоторой части растворителя [37]. Существуют два вида удаления растворителя: путем кипячения или выпаривания или путем испарения при температурах, которые более низкие, чем температура кипячения раствора.

В связи с этим различаются 3 вида кристаллизации с удалением части растворителя: выпаривание с кристаллизацией, кристаллизация с воздушным охлаждением и вакуум-кристаллизация [37].

Кристаллизация без удаления растворителя (изотермическая кристаллизация). Метод удаления растворителя путем выпаривания дорогостоящий, а метод испарения протекает очень медленно и в кристаллизуемый продукт попадают ненужные примеси в виде маточного раствора. В связи с этим часто кристаллизация проводится при охлаждении раствора холодильным рассолом или ледяной водой, в аппаратах, в которых ток раствора осуществляется непрерывно или в аппаратах, снабженных механической мешалкой.

Изотермически-изогедрическая кристаллизация. Метод, при котором из кипящей массы убыль растворителя возмещается внешней подпиткой раствора [14].

1.4. Аппараты для кристаллизации

Аппараты, в которых происходит процесс кристаллизации, называются кристаллизаторами. По условию образования и роста кристаллов

кристаллизаторы можно разделить на поверхностные, в которых образование и рост кристаллов происходит на охлаждаемой поверхности, и объемные, в которых образование и рост кристаллов происходит во всем объеме аппарата.

Также известны аппараты смешенного типа. По способу пересыщения кристаллизаторы подразделяются на изогидрические и изотермические (выпарные) [14]. Схема классификации кристаллизаторов приведена на рис. 1.3.

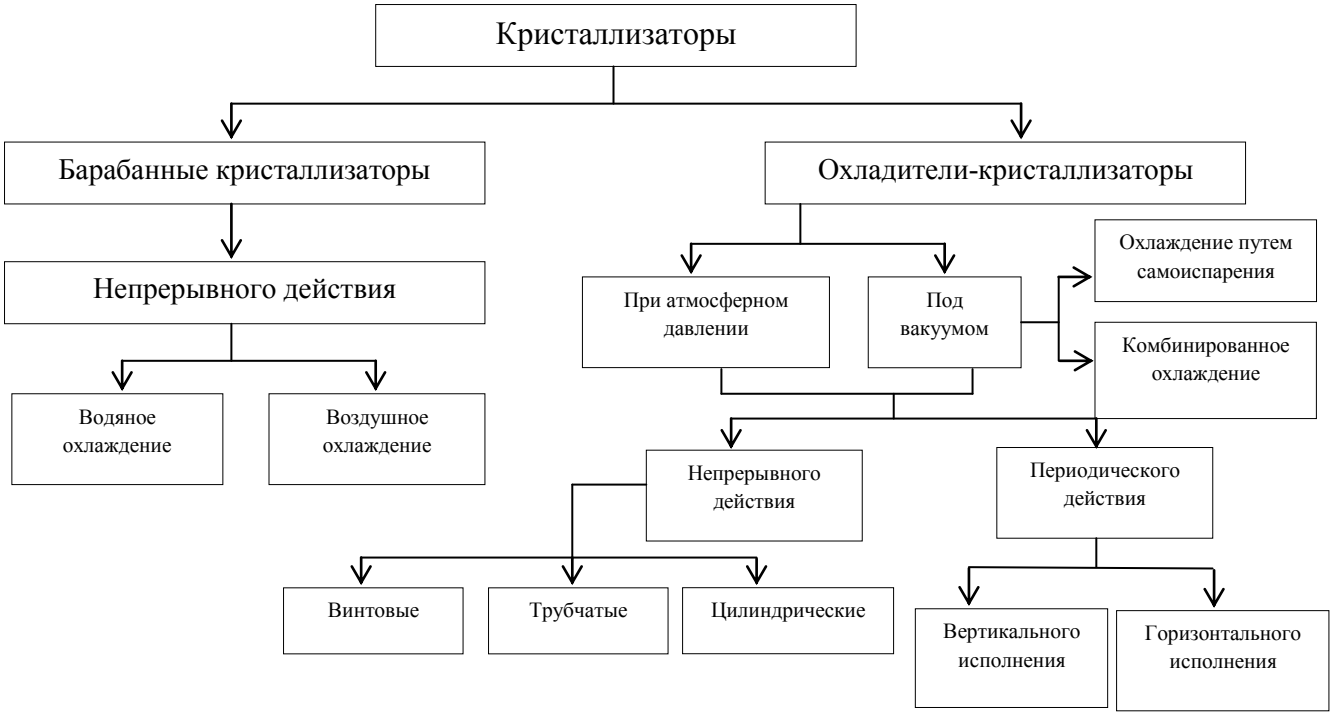


Рис. 1.3. Схема классификации аппаратов для кристаллизации

Поверхностный барабанный кристаллизатор непрерывного действия представлен на рис. 1.4.

В данном кристаллизаторе центры кристаллизации образуются на охлаждаемой поверхности вращающегося полого вальца, в результате понижения температуры нанесенной на нее пленки раствора. Барабан охлаждается холодной жидкостью, подаваемой внутрь него через трубчатый вал с одного торца и выходящей таким же путем с другого торца. Поддон снабжен теплообменной рубашкой для нагревания раствора с целью исключения возможной преждевременной его кристаллизации. Образовавшиеся кристаллы срезаются с поверхности барабана ножом.

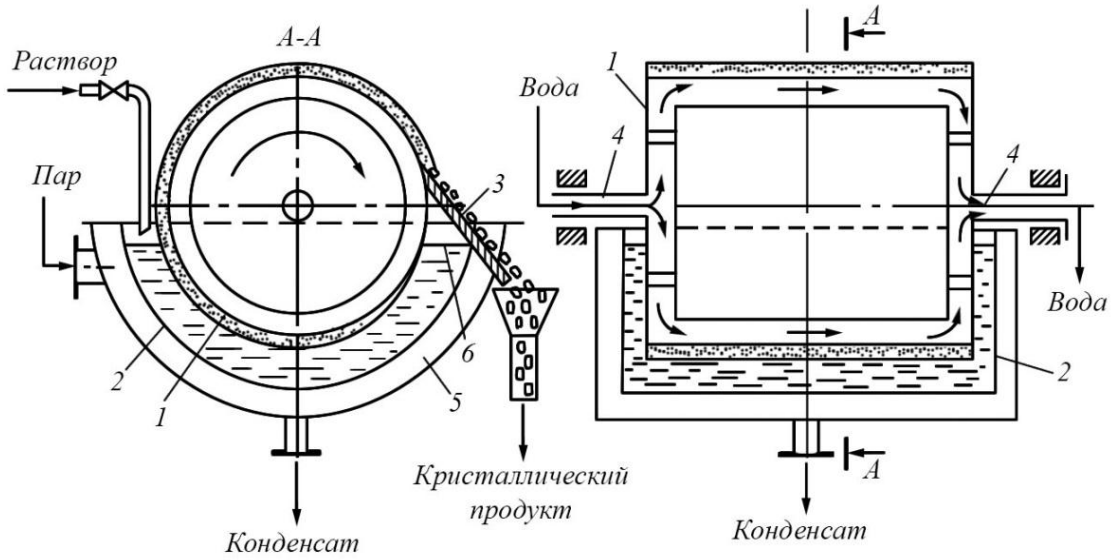


Рис. 1.4. Общая схема поверхностного барабанного кристаллизатора:
1 – полый валец; 2 – поддон; 3 – нож; 4 – трубчатый вал; 5 – теплообменная рубашка; 6 – уровень раствора.

Аппаратами для кристаллизации, которые приобрели наиболее большее применение, являются вакуумные охладители – кристаллизаторы. Данные аппараты, как правило, входят в общий комплект выпарной установки и соединены герметично с выходным патрубком вакуум-аппарата [14]. Наиболее распространённые вакуумные охладители – кристаллизаторы это те, которые работают по принципу самоиспарения.

Вакуум-кристаллизатор показан на рис. 1.5 и представляет собой закрытый вертикальный цилиндрический сосуд с теплообменной рубашкой, работающий под давлением. Днище сосуда имеет эллиптическую форму, что обеспечивает его хорошее опорожнение от продукта.

Крышка вакуум-кристаллизатора бывает откидной или глухой. На ней установлен привод перемешивающего устройства с якорной мешалкой и крепится ловушки для улавливания наиболее крупных частиц продукта, уносимых вторичным паром, образующимся при испарении. Для создания необходимого разряжения в аппарате к выходному фланцу ловушки присоединяют трубопровод вакуум-насоса. Рабочая вместимость таких аппаратов составляет 0,5 и 1 м^3.

Продукт из вакуум-выпарной установки поступает самотеком в вакуум-кристаллизатор через верхнюю часть аппарата (технологический штуцер, окно). Пар подают в теплообменную рубашку и включают перемешивающее устройство.

Продукт охлаждается в результате самоиспарения под действием вакуума в аппарате при абсолютном давлении 0,002 МПа. Для обеспечения равномерности охлаждения и кристаллизации продукта, его перемешивают якорной мешалкой, вращающейся с частотой 30-60 об/мин.

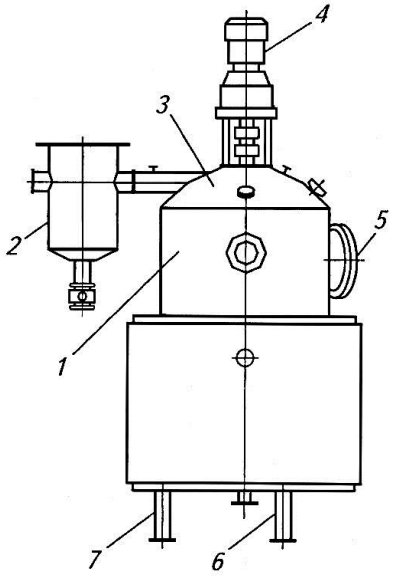


Рис. 1.5. Общая схема вакуум-кристаллизатора:
1 – вертикальный цилиндр; 2 – ловушка; 3 – крышка; 4 – привод; 5 – технологический штуцер; 6 – сливной штуцер; 7 – опора.

Для интенсификации процесса кристаллизации и образования мелких кристаллов лактозы в сгущенный продукт вносят затравку - сухую мелкокристаллическую лактозу (размер кристаллов 2-3 мкм) в количестве 0,04 % массы продукта, которую перед внесением прогревают при 105±2 ^{o}C не менее 1 ч. После внесения в сгущённое молоко лактозы увеличивается число зародышей кристаллизации, которые способствуют образованию мелких кристаллов [16].

В качестве затравки можно использовать сгущённое молоко предыдущей выработки в количестве не менее 10 %. Температура массовой кристаллизации лактозы 27-35 %. Готовый продукт перекачивают насосом из вакуум-кристаллизатора в дозировочно-закаточные агрегаты [16].

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработка процесса кристаллизации лактозы в молочной сыворотке в потоке ставит техническую задачу исследования влияния изменения температуры охлаждения молочной сыворотки на кристаллизацию лактозы, температуры массовой кристаллизации лактозы в зависимости от содержания сухих веществ; количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние; влияния частоты вращения рабочих органов РПА пластинчатого аппарата со скребковым механизмом на количество образующихся кристаллов и их средний размер, а также зависимости среднего размера кристаллов лактозы от температуры нагревания сгущённой молочной сыворотки.

Это определило цель и методологический подход к выполнению исследований.

Структура исследований диссертационной работы включала теоретические, экспериментальные, опытно-производственные этапы, и состояла из следующих основных блоков: анализа научно-технической информации по кругу изучаемых вопросов; разработки рабочей гипотезы; определении методов контроля анализируемых величин; проведении комплекса исследований и анализа полученного экспериментального материала; разработки технологических схем и их аппаратного оформления для исследуемых в диссертационной работе процессов.

Работа выполнена в лаборатории молочных консервов в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности»(ФГБНУ ВНИМИ) в период с 2012 г. по 2015 г. в рамках бюджетных и хоздоговорных работ. Производственная апробация результатов и отработка технологических режимов проводилась в экспериментальном цехе в ОАО «Учебно-опытный молочный завод» Вологодской государственной молочно-хозяйственной академии имени Н.В. Верещагина в период с 2013 года по 2014 год.

2.1. Методологический подход к выполнению исследований

Методологический подход в настоящей работе основан на разработанной общей схеме исследований (рис. 2.1). Настоящая модель состоит из комплекса последовательных и взаимосвязанных этапов выполнения и обобщения исследований по разработке процесса кристаллизации лактозы в молочной сыворотке в потоке.

Общий методологический подход к выполнению исследований состоял в следующем:

– исследование закономерностей теплообмена при кристаллизации лактозы в потоке, влияния температуры охлаждения на кристаллизацию лактозы молочной сыворотки во взаимосвязи с температурой хладоносителя и площадью теплопередачи аппарата;

– определение температуры массовой кристаллизации лактозы;

– определение количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние;

– исследование влияния частоты вращения рабочих органов РПА на количество образующихся кристаллов лактозы;

– исследование влияния частоты вращения рабочих органов РПА на средний размер кристаллов лактозы;

– разработке методики инженерного расчёта пластинчатого скребкового теплообменного аппарата;

– разработке номограмм для проведения инженерного расчёта пластинчатого скребкового теплообменного аппарата

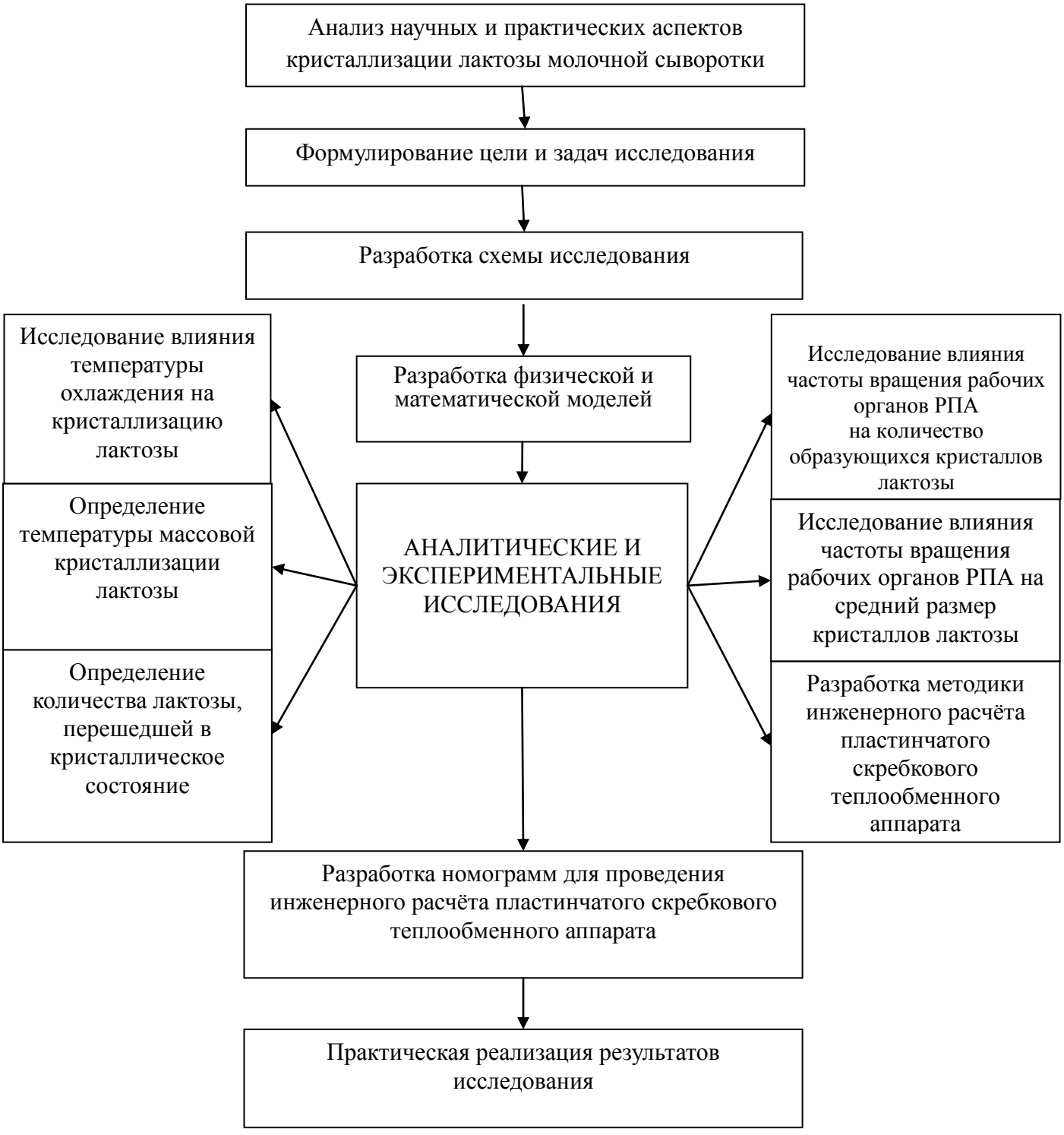


Рис. 2.1. Общая схема исследований

2.2. Объекты и методы исследований, приборное обеспечение

Объектом исследований являлась восстановленная до 50-60 % содержания сухих веществ молочная подсырная сыворотка с начальной температурой 60-65 ^{o}C и пластинчатый скребковый трехсекционный теплообменник.

При выполнении работы использовали общепринятые и стандартизованные методы исследований в химико-технологическом и микробиологическом контроле молочных продуктов, которые изложены в специализированных литературных источниках, а также оригинальные методы, комплексно обеспечивающие выполнение поставленных задач.

Стандартизованные методы со ссылкой на первоисточник приведены в таблице 2.1. Правила приемки, отбора проб молока и молочных продуктов, подготовку их к физико-химическим испытаниям и органолептической оценке проводили в соответствии с ГОСТ 3622-68, ГОСТ 26809-86 и ГОСТ 13928-84.

Таблица 2.1.

№	Наименование показателя	Принцип	Источник
1.	Массовая доля влаги и сухого вещества	Метод высушивания при (102±2) ^{o}C Метод высушивания при (125±2) ^{o}C на приборе Чижовой и с применением рефрактометра УРЛ-2	ГОСТ 3626-73 ГОСТ 29246-91 ГОСТ 30305.1-95
2.	Определение размеров кристаллов лактозы	Поляризационно-интерференционный микроскоп с иммерсионным объективом 40 крат и видеоокуляр НВ-35 с разрешением 240х320 совместно с персональным компьютером и программным обеспечением	ГОСТ 29245-91

Определение массовой доли сухих веществ в молочных сыворотке определяли с применением рефрактометра УРЛ-2. Сущность метода заключается в том, что определяется показатель преломления (рефракции) сгущенной молочной сыворотки. Показатель преломления молока складывается из показателя преломления воды (1,3330) и основных составных частей

обезжиренного остатка молока: казеина, лактозы, солей и других компонентов [28]. Приращение показателя преломления в среднем при увеличении массовой доли лактозы на один процент составляет 0,0014. В связи с тем, что температура влияет на величину показателя преломления, то отсчет показаний проводится при строго определенной температуре [68,85].

Линейные размеры кристаллов лактозы, количество кристаллов лактозы в исследуемых образцах сгущенной молочной сыворотки определяли микроскопированием с применением поляризационно-интерференционного микроскопа высокой разрешающей способности BIOLAR с иммерсионным объективом 40 крат и видеоокуляром НВ-35 с разрешением 240х320 совместно с персональным компьютером и программным обеспечением «Микро-Анализ Pro». Значения линейных размеров и количества кристаллов сгущенной молочной сыворотки выводились в таблицу Microsoft Excel.

Для проведения исследований была разработана и изготовлена пилотная установка для поточной кристаллизации лактозы в лактозосодержащих продуктах. Подробное описание установки и её принципа работы представлено в главе 4.

2.3. Методы математического моделирования и статистической обработки экспериментальных данных

Результаты экспериментальных исследований обрабатывали методами математической статистики [1,65,76,131,134,135]. Доверительная вероятность результатов математической обработки была не ниже: данных физико-химического анализа 0,95; результатов технологического и микробиологического экспериментов 0,90 и 0,80 соответственно. Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с применением методов регрессионного анализа с использованием прикладного программного обеспеченияMicrosoft Excel, «MatCad», «CurveExpert», «MatLab», «Микро-Анализ Pro» и др.

С учетом многообразия и сложности исследуемых процессов, следует отметить, что часть вопросов по организации экспериментов, их практического и аппаратурного исполнения освещены в соответствующих разделах.

ГЛАВА 3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛАКТОЗЫ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ В ПОТОКЕ

3.1.Особенности теплообмена при кристаллизации лактозы молочной сыворотки в потоке

Подход к изучению закономерностей теплообмена при кристаллизации лактозы в сгущённой молочной сыворотке в потоке основан на преемственности основных теоретических положений теорий теплопередачи и гидродинамики для сырья биологического происхождения, развитых в работах Алексеева Г.В., Антипова С.Т., Бражникова А.М, Гинзбурга А.С., Плаксина Ю.М., Барановского Н.В., Острикова А.Н., Ивашова В.И., Кошевого Е.П., Лыкова А.В., Лыковой А.В., Маслова А.М., Суркова В.Д., Broun D.J., Pepples M.L.,Spreer E., Walstra P., JennessR. и других ученых и специалистов [9, 6,11, 15,24,25, 30, 33-36, 44,45,47, 61, 72-74, 110,111, 68, 92, 107].

Исследования ученых Храмцова А.Г., Полянского К.К., Евдокимова И.А., Гарковенко Н.И., Перелыгина В.М.Гнездиловой А.И., Фиалкова А.Н., Фиалковой Е.А., Харитонова В.Д., Червецова В.В., учёных и специалистов ВНИМИ и других создали научные основы исследования лактозы лактозосодержащего сырья, её кристаллизации в молочной сыворотке и концепцию создания технологии лактозы. Основная суть современной технологии лактозы лактозосодержащего сырья сводится к энерго и ресурсосбережению [68, 89, 53, 57,59,66, 87].

Для изучения закономерностей теплообмена при кристаллизации лактозы предложена физическая модель (рис. 3.1), учитывающая изменение температуры сгущённой молочной сыворотки при кристаллизации в ней лактозы в потоке во взаимосвязи с вязкостными свойствами сгущённой молочной сыворотки и температурой хладоносителя.

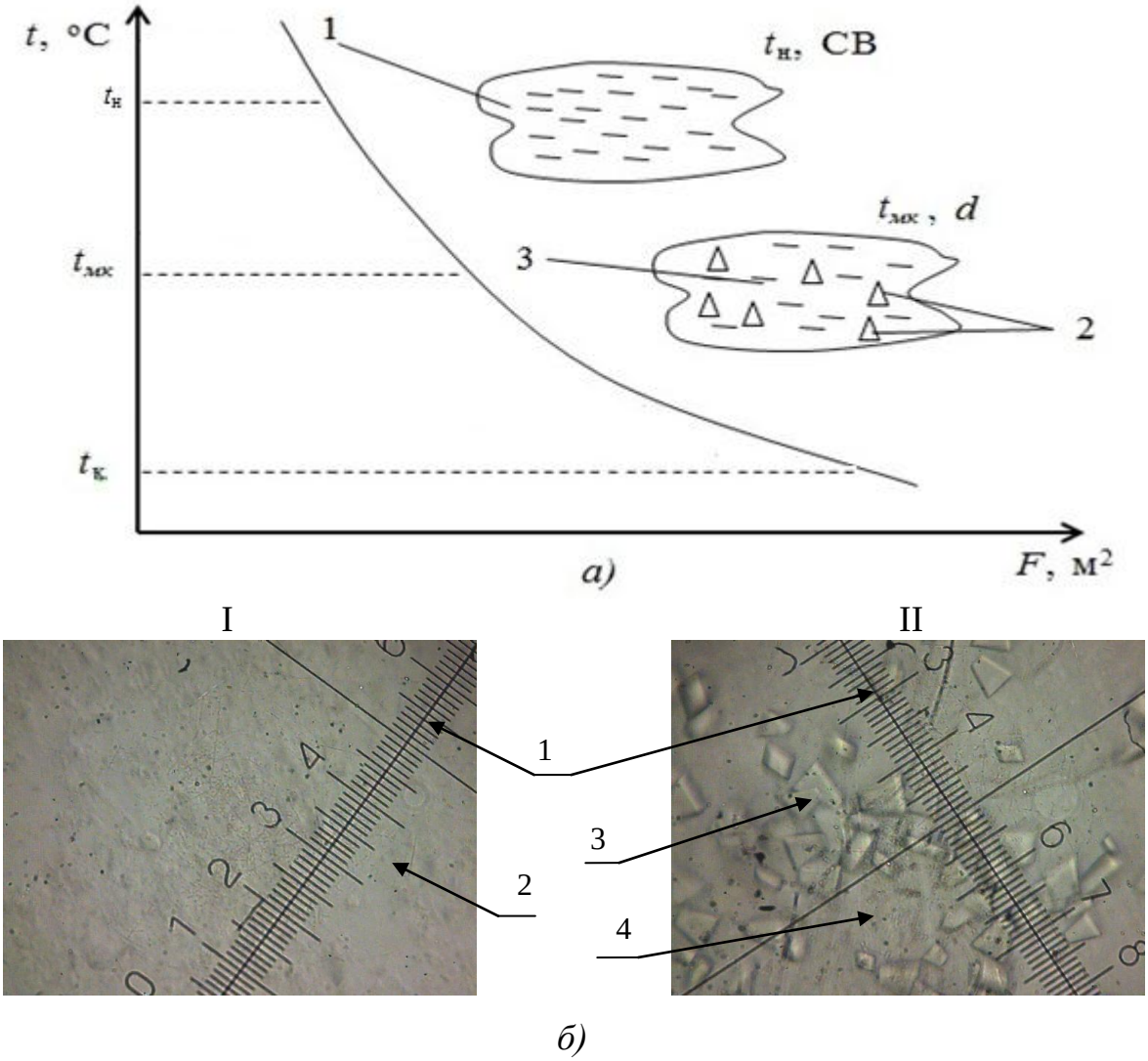


Рис. 3.1. Физическая модель процесса кристаллизации:
а) – схема физической модели: $t_н$, $t_{мк}$, $t_к$ – температура, соответственно, начальная, массовой кристаллизации, конечная; СВ – массовая доля сухих веществ; F – площадь теплопередающей поверхности аппарата; 1 – сгущенная молочная сыворотка; 2 – кристаллы лактозы; 3 – межкристаллическая жидкость (меласса); *б)* – микрофотографии сгущённой молочной сыворотки при температуре: I -55 °С и II -37 °С: 1 – размерная линейка; 2 – сгущенная молочная сыворотка; 3 – кристаллы лактозы; 4 – межкристаллическая жидкость (меласса).

Сгущённая молочная сыворотка рассматривается как многокомпонентная полифункциональная биологически активная система, изменяющая свои свойства под воздействием внешних условий. Сгущённая молочная сыворотка, с массовой долей сухих веществ 50-65 %, в нормальных условиях представляет собой насыщенный раствор, который при охлаждении переходит в пересыщенный раствор и при определённой температуре охлаждения в нём происходит

образование кристаллов лактозы (начинается процесс кристаллизации), которые далее выпадают в осадок.

Важной особенностью при охлаждении сгущённой молочной сыворотки и кристаллизации в ней лактозы является измерение вязкостных свойств сгущённой молочной сыворотки. Эти изменения объясняются тем, что сгущённая молочная сыворотка при охлаждении из области ньютоновской жидкости переходит в область неньютоновской.

По данным исследований [68,89] высококонцентрированные лактозосодержащие растворы в зависимости от температуры ведут себя как псевдопластичные жидкости, не имеющие предела текучести, и отличаются уменьшением кажущейся вязкости с увеличением скорости сдвига. Для описания течения таких жидкостей применяют уравнение Оствальда-де Виля

$$\tau = k \cdot \gamma^n, \qquad (3.1)$$

где τ – напряжение сдвига, Пас; k - опытный коэффициент; γ- скорость сдвига, $с^{-1}$; n - индекс течения (n< 1- для псевдопластичных жидкостей).

Аналогичные явления характерны и для других пищевых сред, например для сливок, при производстве сливочного масла преобразованием высокожирных сливок. По данным ВНИИМС при охлаждении сливок вначале происходит кристаллизация тугоплавких триглицеридов, а затем легкоплавких жиров. Сливки вначале охлаждения имеет вязкость и ярко выраженные свойства ньютоновской жидкости. При дальнейшем охлаждении сливки ведут себя как неньютоновская жидкость с соответствующей вязкостью [74, 2].

В связи с этим аналитическое исследование закономерностей теплообмена при кристаллизации лактозы молочной сыворотки требует учёта изменения вязкостных свойств сгущённой молочной сыворотки при её охлаждении. Учёт этих особенностей усложняют аналитическое исследование теплообмена при охлаждении сгущённой молочной сыворотки.

Кристаллизацию лактозы при охлаждении сгущённой молочной сыворотки в потоке реализуем в скребковом теплообменном аппарате непрерывного действия пластинчатого типа. В качестве теплопередающей поверхности в данном аппарате

используются герметичная конструкция из двух соосных сварных пластин в форме диска. Эта конструкция условно названа теплообменной пластиной. Определённое количество теплообменных пластин образует теплообменные секции аппарата.

Герметичное пространство, ограниченное дисковыми пластинами, образуют зону, названную продуктовой, в которой осуществляется охлаждение сгущённой молочной сыворотки и кристаллизации лактозы.

Сгущённая молочная сыворотка может поступать в продуктовую зону теплообменной пластины, как из центрального отверстия, так и из отверстий, расположенных на периферии дисков.

Для анализа закономерностей переноса теплоты значение имеет выбор направления движения теплообменных сред. Выбор направления движения тепло-хладоносителей имеет большое значение в процессах теплопередачи и осуществляется на основе аналитического анализа преимуществ и недостатков того или другого направления движения [14].

Направление движения сгущённой молочной сыворотки и хладоносителя между которыми находится стенка, образованная дисковыми пластинами, может осуществляться по направлению прямотока и противотока. Однако следует иметь в виду, что противоток позволяет получить более эффективные результаты теплообмена. [14].

В качестве примера на рис. 3.2. приведена схема противоточного течения сгущённой молочной сыворотки и хладоносителя в теплообменной пластине скребкового пластинчатого аппарата.

Стрелками на рис. 3.2. показано движение сгущённой молочной сыворотки и хладоносителя: 1, 2 – вход и выход сгущённой молочной сыворотки соответственно; 3, 4 – вход и выход хладоносителя соответственно; T_1 – начальная температура сгущённой молочной сыворотки, T_{2i} –температура сгущённой молочной сыворотки на выходе из *i*-теплообменной пластины; T_{x0} – начальная температура хладоносителя; T_{xi} - температура хладоносителя на выходе из *i*-теплообменной пластины.

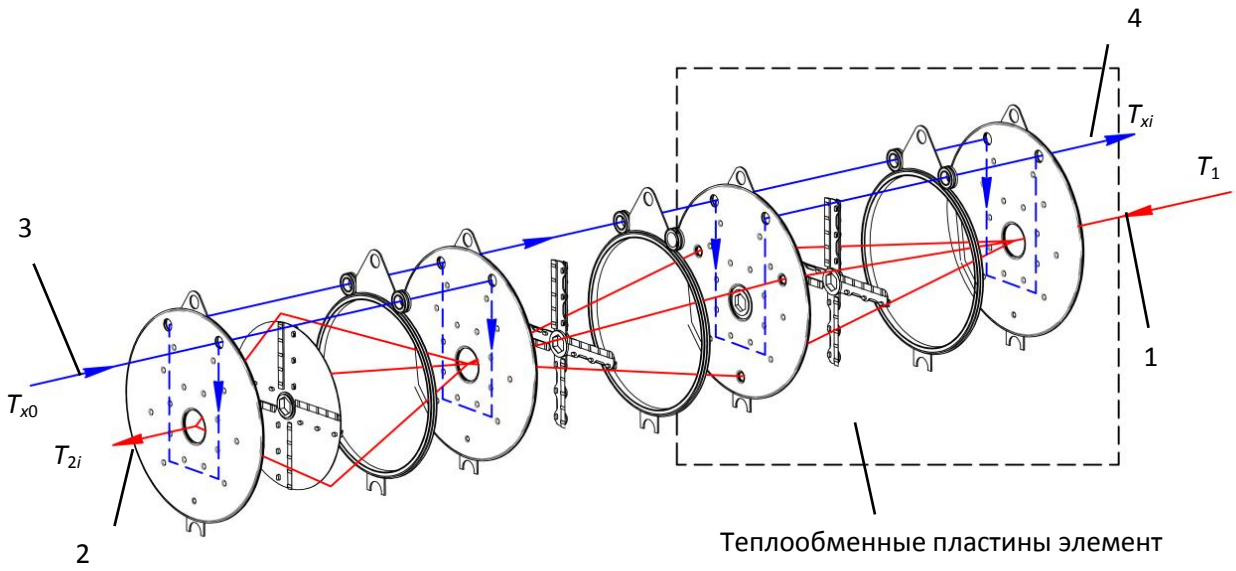


Рис. 3.2. Схема противоточного течения сгущённой молочной сыворотки и хладоносителя.

С учётом рассмотренных особенностей организации процесса и проведения исследования закономерностей теплообмена при кристаллизации лактозы сгущённой молочной сыворотки в потоке целесообразно изучить на примере одной теплообменной пластины. Причём, в связи со сложностью анализа изменения температуры сгущённой молочной сыворотки в потоке, необходимо определять её температуру на выходе из каждой теплообменной пластины аппарата. Кроме этого, необходимо определить количество теплообменных пластин аппарата, а точнее пластину, в которой начинается кристаллизации лактозы.

3.2. Аналитическое исследование изменения температуры охлаждения сгущённой молочной сыворотки при кристаллизации лактозы

Для аналитического исследование изменения температуры охлаждения сгущённой молочной сыворотки при кристаллизации лактозы в потоке будем руководствоваться следующими общими допущениями [11, 12, 61]:

1. Изменение температуры сгущённой молочной сыворотки при кристаллизации в ней лактозы изучаем для одной теплообменной пластины.

2. Объем продукта, находящейся в продуктовой зоне рассматриваем как цилиндрическое тело малой высоты (диск).

3. Сгущённая молочная сыворотка рассматривается как псевдопластичная жидкость. Для описания её течения при охлаждении в аппарате используем уравнение Оствальда-де Виля.

4. Течение сгущённой молочной сыворотки внутри теплообменной пластины при её охлаждении и кристаллизации лактозы рассматриваем как ламинарное, неизотермическое при постоянном расходе без нарушения сплошности потока.

5. Траектория течения сгущённой молочной сыворотки в аппарате сложная: Она может подаваться как в центральное отверстие и двигаться на периферию, так и, поступая через периферийные отверстия, перемещаться в сторону центра [9].

6. Распределение температуры в сгущённой молочной сыворотке равномерное и не зависит от способа её подачи в теплообменную пластину (периферийная или центральная подача).

Изучение распределения температуры сгущённой молочной сыворотки в теплообменной пластины проведём с помощью дифференциальных уравнений переноса теплоты в движущихся жидких средах, записанных в цилиндрической системе координат при осесимметричном распределении температуры, без учета диссипации энергии [11, 122, 14, 71, 41].

$$v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right), \qquad (3.2)$$

где T – температура в точках продукта в градусах Цельсия, r и z – цилиндрические координаты точки продукта, v_r и v_z − проекции скорости точек продукта на оси r и z, a – коэффициент температуропроводности.

Поскольку канал для течения продукта имеет довольно сложную форму (рис. 3.2. и 3.3), то для теоретического расчета сделаем ряд дополнительных упрощений не сильно искажающих реальную картину. Полагаем, что осевая скорость продукта v_z значительно меньше радиальной v_r и окружной v_φ

скоростей, поэтому в уравнении (3.2) положим $v_z \frac{\partial T}{\partial z} \approx 0$. Для определения радиальной скорости v_r воспользуемся дифференциальным уравнением стационарного осесимметричного течения несжимаемой нелинейно-вязкой жидкости, полагая в нем реологические константы и плотность продукта ρ не зависящими от температуры для данной теплообменной пластины.

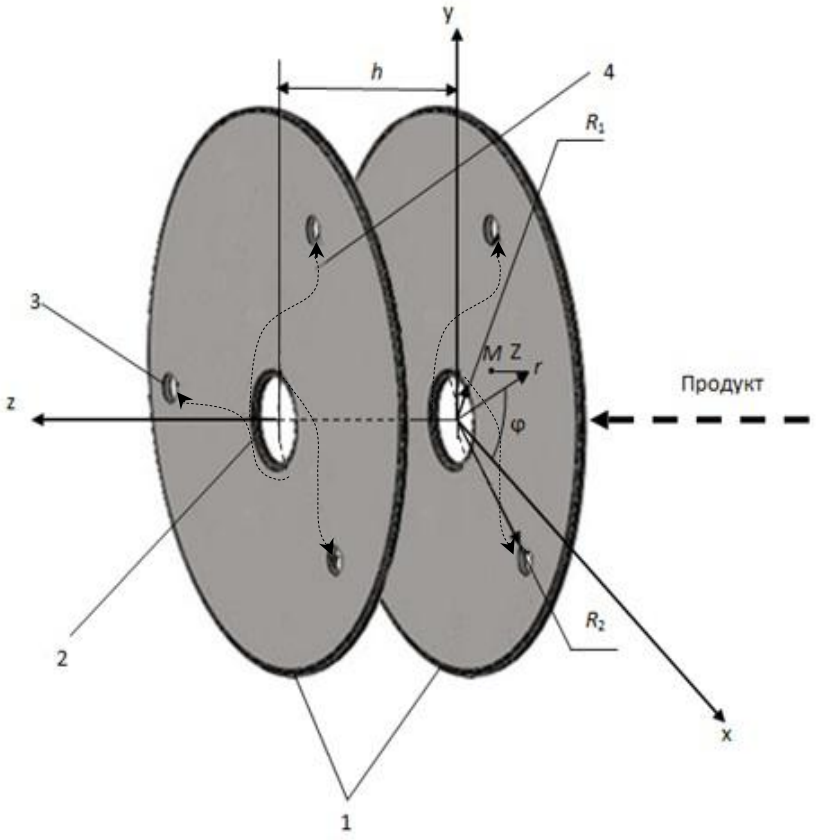


Рис. 3.3. Расчётная схема:
1 – продуктовые пластины; 2 – центральное отверстие; 3 – периферийные отверстия; 4 – линии тока продукта.

Для этого запишем общее дифференциальное уравнение осесимметричного стационарного течения сплошной среды в напряжениях [41, 9, 10] в проекции на радиальное направление *r*

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\varphi^2}{r} = F_r + \frac{1}{\rho}\left\{\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi}}{r}\right\}, \qquad (3.3)$$

где τ_{rr}, $\tau_{\varphi\varphi}$ – нормальные напряжения на площадках перпендикулярных соответственно радиальной r и окружной φ осям, τ_{rz} – касательное напряжение на площадках перпендикулярных осям r и z.

Реологические исследования сгущённой молочной сыворотки позволяют с большой точностью принять в качестве ее реологической модели степенную модель Оствальда – де Виля. Для такой модели компоненты тензора напряжений, входящие в уравнение (3.1), при сделанных ранее предположениях имеют вид [145]

$$\tau_{rr} = -p + 2k\left|H\right|^{n-1}\frac{\partial v_r}{\partial r},\ \tau_{\varphi\varphi} = -p + 2k\left|H\right|^{n-1}\frac{v_r}{r},\ \tau_{rz} = k\left|H\right|^{n-1}\frac{\partial v_r}{\partial z}, \quad (3.4)$$

где k и n – реологические константы сгущённой молочной сыворотки, H – интенсивность скоростей деформации равная

$$H = \sqrt{\frac{1}{6}\left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{v_r}{r}\right)^2 + \left(-\frac{\partial v_r}{\partial r}\right)^2\right] + \frac{1}{4}\left(\frac{\partial v_r}{\partial z}\right)^2}. \quad (3.5)$$

Величина $k\left|H\right|^{n-1}$ может рассматриваться как некоторая кажущаяся (эффективная) вязкость.

Уравнение неразрывности (несжимаемости) справедливое для любой жидкой среды при сделанных предположениях имеет вид

$$\frac{\partial\left(r\,v_r\right)}{\partial r} = 0. \quad (3.6)$$

Интегрируя уравнение (3.6) находим

$$v_r = \frac{1}{r}\,f\left(z\right). \quad (3.7)$$

На основании равенства (3.7) для интенсивности скоростей деформации H из (3.5) получим выражение

$$H = \sqrt{\left(\frac{f\left(z\right)}{r^2}\right)^2 + \left(\frac{f'\left(z\right)}{2r}\right)^2}, \quad (3.8)$$

где штрих во втором слагаемом подкоренного выражения и далее означает производную по координате z.

Оценим порядки слагаемых в подкоренном выражении формулы (3.8), приведя ее к безразмерному виду. Для этого запишем следующие соотношения между размерными и безразмерными величинами, входящими в (3.8)

$$z = \bar{z}\, h, \quad r = \bar{r}\, R_2, \quad f(z) = \hat{v}_r\, R_2\, \overline{f(z)}, \quad f'(z) = \frac{\hat{v}_r\, R_2}{h}\, \overline{f'(z)}\,, \qquad (3.9)$$

где в качестве характерных координат взяты зазор h между дисками и радиус R_2 центров выходных отверстий (рис. 3.4); маленькая дуга над v_r означает осреднение по координате r, а верхняя черта обозначает безразмерную величину.

Подставив выражения размерных величин по соотношениям (3.9) в формулу (3.8), приведем ее к виду

$$H = \frac{\hat{v}_r\, h}{\bar{r}} \sqrt{\left(\frac{\overline{f(z)}}{\bar{r}^2}\right)^2 \frac{h^2}{R_2^2} + \left(\frac{\overline{f'(z)}}{2}\right)^2}\,. \qquad (3.10)$$

Так как в формуле (3.10) подкоренное выражение приведено к безразмерной форме, то порядки слагаемых в этом выражении будут определяться порядком коэффициентов при этих слагаемых. Коэффициент при первом слагаемом значительно меньше коэффициента при втором слагаемом, т. е. $\frac{h^2}{R_2^2} << \frac{1}{4}$. Так, например, если положить $h \sim 10^{-3}$ *м* и $R_2 \sim 10^{-2}$ *м*, то $\frac{h^2}{R_2^2} \sim 0{,}01$. Таким образом, в подкоренных выражениях (3.10) и (3.8) можно оставить только вторые слагаемые. На этом основании интенсивность скоростей деформации (3.8) запишется как

$$H = \left|\frac{f'(z)}{2r}\right| = \frac{1}{2r}\left|f'(z)\right|. \qquad (3.11)$$

В этом случае с учетом (3.7) соотношения (3.4) примут следующий вид

$$\tau_{rr} = -p - 2k\left|\frac{f'(z)}{2r}\right|^{n-1}\frac{f(z)}{r^2},\ \tau_{\varphi\varphi} = -p + 2k\left|\frac{f'(z)}{2r}\right|^{n-1}\frac{f(z)}{r^2},\ \tau_{rz} = k\left|\frac{f'(z)}{2r}\right|^{n-1}\frac{f'(z)}{r}. \qquad (3.12)$$

Так как сгущённая молочная сыворотка принудительно вращается в РПА, то окружная скорость её точек не больше величины ωr, где ω – угловая скорость лопастей мешалки. Поэтому примем эту величину за окружную скорость v_φ, т. е.

$$v_\varphi = \omega r, \qquad (3.13)$$

Подстановка выражений компонент тензора напряжений из (3.12) и окружной скорости (3.13) при условии $v_z \approx 0$ в уравнение (3.3) приводит это уравнение к следующему виду

$$-\frac{[f(z)]^2}{r^3} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial r}\left(p - \frac{\rho\omega^2 r^2}{2}\right) + \frac{k}{\rho}\left(\frac{1}{2}\right)^{n-1}\left(\frac{1}{r}\right)^n\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(f'(z)\right)^n\right]sign\ f'(z). \qquad (3.14)$$

Выражение в левой части равенства (3.14) значительно меньше каждого из слагаемых в его правой части. Это следует из оценок, сделанных аналогично оценкам в формуле (3.8). Тогда можно принять $\frac{[f(z)]^2}{r^3} \sim 0$ и в получившемся уравнении разделяются слагаемые, зависящие только от соответствующих координат r и z. Кроме того, в первом слагаемом правой части величина $\frac{\rho\omega^2 r^2}{2} << p$ и ей можно пренебречь по сравнению с давлением p. Это следует из условия малости угловой скорости ω вращения мешалок. Так, например, в реальных аппаратах данного типа [9, 15, 45, 61] $p \sim 10^5\ Па$, $\omega \sim 4 c^{-1}$, $r \sim 0{,}1 м$, $\rho \sim 10^3\ кг/м^3$.

Отсюда следует справедливость усиленного неравенства, написанного выше. На этом основании уравнение (3.14) запишется как

$$r^n\frac{\partial p}{\partial r} = k\left(\frac{1}{2}\right)^{n-1}\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(f'(z)\right)^n\right]sign\ f'(z). \qquad (3.15)$$

При этом считается, что давление p не зависит от поперечной координаты z. В дальнейшем, в силу симметрии профиля радиальной скорости относительно срединной плоскости дисков, будем при гидродинамических расчетах рассматривать область $0 \le z \le \frac{h}{2}$. Для этой области $sign\ f'(z) = 1.$

Приравнивая левую и правую части (3.15) к одной и той же константе A с учетом $sign\ f'(z) = 1$, получим два обыкновенных дифференциальных уравнения относительно функции $f(z)$ и давления p

$$r^n \frac{\partial p}{\partial r}(p) = A, \tag{3.16}$$

$$k\left(\frac{1}{2}\right)^{n-1} \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(f'(z)\right)^n\right] = A. \tag{3.17}$$

Уравнения (3.16), (3.17) будем решать при следующих граничных условиях:

$$r = R_1,\ p(R_1) = p_1;\ r = R_2,\ p(R_2) = p_2, \tag{3.18}$$

$$z = 0,\ f(r, 0) = 0;\ z = \frac{h}{2},\ f'\left(r, \frac{h}{2}\right) = 0, \tag{3.19}$$

где R_2 – расстояние центров выходных отверстий от центров дисков; последнее из граничных условий (3.19) следует из симметрии профиля радиальной скорости относительно срединной плоскости $z = \frac{h}{2}$.

Интегрированием уравнений (3.16) и (3.17) при граничных условиях (3.18) и (3.19) получаем выражения для давления $p(r)$ и функции $f(z)$

$$p(r) = p_1 - \frac{p_1 - p_2}{R_2^{1-n} - R_1^{1-n}}\left(r^{1-n} - R_1^{1-n}\right), \tag{3.20}$$

$$f(z) = -\left[-\frac{(p_1 - p_2)(1-n)}{k\left(R_2^{1-n} - R_1^{1-n}\right)}\right]^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1}\left[\left(\frac{h}{2} - z\right)^{\frac{n+1}{n}} - \left(\frac{h}{2}\right)^{\frac{n+1}{n}}\right]. \tag{3.21}$$

Поточная кристаллизация лактозы развивается в сложных гидродинамических условиях и широком температурном диапазоне для сгущённой молочной сыворотки [15, 92,107].

Для полного гидродинамического расчета пластинчатого аппарата для охлаждения сгущённой молочной сыворотки при кристаллизации лактозы [9] представляется важным получить зависимость между перепадом давления $p_1 - p_2$ на входе и выходе сгущённой молочной сыворотки из данной теплообменной пластины и расходом сгущённой молочной сыворотки q, используя формулу $q = 4\pi r \int_0^{\frac{h}{2}} v_r \, dz$. Подставив в эту формулу выражение v_r с учетом (3.21) и интегрируя, получим

$$q = 2\pi h \frac{2n}{2n+1} \left(\frac{h}{2}\right)^{\frac{n+1}{n}} \left[\frac{(p_1 - p_2)(1-n)}{k\left(R_2^{1-n} - R_1^{1-n}\right)}\right]^{\frac{1}{n}}. \qquad (3.22)$$

Таким образом, формула (3.22) позволяет определять расход сгущённой молочной сыворотки в зависимости от разности давления на входе и выходе из теплообменной пластины, т.е. с учётом гидравлического сопротивления теплообменных пластин секций аппарата.

Перейдем к определению температуры в продукте по уравнению (3.2) с учетом $v_z \frac{\partial T}{\partial z} \approx 0$. Для этого подставим в левую часть данного уравнения выражение радиальной скорости (3.7) и разделим его левую и правую части на коэффициент температуропроводности *a*. После этого получим

$$\frac{f(z)}{r} \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \qquad (3.23)$$

Поскольку точного аналитического решения данного уравнения получить нельзя воспользуемся приближенным решением, заключающемся в частичном осреднении его конвективной части (левая часть уравнения) по толщине зазора

между дисками и использовании метода последовательных приближений. Для этого в левой части равенства (3.22) положим $f(z) \approx \overline{f(z)} = \frac{2}{h}\int_0^{h/2} f(z)dz$.

Проинтегрировав функцию $f(z)$ (3.21) в пределах от 0 до $\frac{h}{2}$, находим

$$\overline{f(z)} = \frac{2n}{2n+1}\left(\frac{h}{2}\right)^{\frac{n+1}{n}}\left[\frac{(p_1-p_2)(1-n)}{k\left(R_2^{1-n}-R_1^{1-n}\right)}\right]^{\frac{1}{n}}. \qquad (3.24)$$

Таким образом, уравнение (21) заменится приближенным уравнением, приведенным к стандартной форме

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}(1-B) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \qquad (3.25)$$

где через B обозначена величина $\overline{f(z)}$ из (3.24) деленная на a, т. е.

$$B = \frac{\overline{f(z)}}{a}. \qquad (3.26)$$

Данное уравнение решаем при следующих граничных условиях

$$r = R_1,\ T = T_1,\ z = 0,\ T = T_3,\ \ z = h,\ T = T_4, \qquad (3.27)$$

где T_3 и T_4 − температуры сгущённой молочной сыворотки на стенках дисков (дисковых пластин)

Решение линейного уравнения (3.25) найдем методом разделения переменных, добавив к его общему решению частное решение специального вида. Для этого положим

$$T(r,z) = R(r)\cdot Z(z) + T_3 + \frac{z}{h}(T_4 - T_3). \qquad (3.28)$$

Подстановкой этого выражения T в (3.25) и разделения переменных, получим для функций $R(r)$ и $Z(z)$ обыкновенные дифференциальные уравнения

$$Z'' + \lambda^2 Z = 0, \qquad (3.29)$$

$$r R'' + R'(1-B) - \lambda^2 r R = 0. \qquad (3.30)$$

где λ^2 − константа разделения.

Решение уравнения (3.29) имеет вид

$$Z(z) = C_1 \cos \lambda z + C_2 \sin \lambda z . \qquad (3.31)$$

В силу двух последних граничных условий (3.27) и выражения (3.28) функция $Z(z)$ должна обращаться в ноль при $z = 0$ и $z = h$. Отсюда следует

$$C_1 = 0 , \quad \lambda = \frac{k\pi}{h} , \quad k = 1, 2, ... \infty , \qquad (3.32)$$

т. е. общее решение уравнения (3.25) будет представлено рядом Фурье по синусам.

Уравнение (3.30) является уравнением Бесселя произвольного порядка, зависящего от константы B. Поскольку такие функции не табулированы, то дальше будем решать уравнение (3.25) методом последовательных приближений. Для этого проведем оценку порядка слагаемых в этом уравнении, приведя его к безразмерному виду. Напишем соотношения между размерными и безразмерными величинами

$$T = T_0 \overline{T} , \quad r = R_2 \bar{r} , \quad z = h \bar{z} , \qquad (3.33)$$

где T_0 – характерная размерная величина искомой функции, $\overline{T}$ – безразмерная искомая функция, $\bar{r}$ – безразмерная радиальная координата, R_2 – характерный радиальный размер, $\bar{z}$ – безразмерная осевая координата. В качестве характерной осевой координаты взято расстояние h между дисками.

Перейдя в уравнении (3.25) к безразмерным величинам получим

$$\frac{h^2}{R_2^2} \frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial \bar{r}^2} + \frac{(1-B)h^2}{R_2^2} \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \overline{T}}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial \bar{z}^2} = 0 . \qquad (3.34)$$

Таким образом, в безразмерном уравнении (3.34) порядки слагаемых будут определяться только порядками коэффициентов в этих слагаемых.

Для оценки порядка этих коэффициентов примем следующие порядки конструктивных параметров аппарата и параметров обрабатываемой сгущённой молочной сыворотки

$h \sim 0{,}01 м, R_1 \sim 0{,}01 м, R_2 \sim 0{,}1 м, q \sim 10^{-4} м^3/с, \ a \sim 10^{-6} м^2/с, k \sim 10 Па \cdot с, n \sim 1.$

Коэффициент B во втором слагаемом, согласно (3.24) и (3.26) будет иметь порядок 10^4, т. е. $B>>1$. Коэффициент в последнем слагаемом уравнения (3.34) имеет порядок 1. Принимая во внимание, что $\frac{h^2}{R_2^2} << \frac{Bh^2}{R_2^2} \sim 1$, оставим в уравнении (3.34), а значит и в уравнении (3.25) два последних слагаемых. [9, 11, 12].

На этом основании уравнение (3.25) для нулевого приближения при условии $B>>1$ примет вид

$$-\frac{B}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=0. \qquad (3.35)$$

Решим уравнение (3.35) методом разделения переменных, представив его решение в виде (3.28). После разделения переменных для функций $R(r)$ и $Z(z)$ получим обыкновенные дифференциальные уравнения

$$\frac{R'}{R}=-\frac{\lambda^2}{B}r. \qquad (3.36)$$

и (3.29), решением, которого будет функция (3.31) при значениях констант (3.32). Решение уравнения первого порядка с разделяющимися переменными (3.36) запишется в виде

$$R(r)=C_3\, e^{-\frac{\lambda^2}{2B}r^2}, \qquad (3.37)$$

где C_3 − постоянная интегрирования. Таким образом, на основании (3.28), (3.31), (3.32) и (3.37) получим решение уравнения (3.35) в виде ряда

$$T(r,z)=\sum_{j=1}^{\infty} C_j\, e^{-\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}r^2} \sin\frac{j\pi}{h}z+T_3+\frac{z}{h}(T_4-T_3), \qquad (3.38)$$

где $C_к = C_2\, C_3$ и индекс j показывает, что эта константа будет зависеть от номера j собственных чисел λ из (3.32).

Постоянные интегрирования C_j, найдём, используя первое граничное условие (3.27), т. е. $T(R_1, z)=T_1$. На основании этого условия и соотношения (3.38) получим уравнение для определения C_j

$$k$$

$$T_1 - T_3 - \frac{z}{h}(T_4 - T_3) = \sum_{j=1}^{\infty} C_j \, e^{-\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}R_1^2} \sin\frac{j\pi}{h} z \,. \qquad (3.39)$$

Используя формулу для определения коэффициентов ряда Фурье на интервале $0 \le z \le h$, найдем

$$C_j = \frac{2}{j\pi}\left[T_1 - T_3 - (T_1 - T_4)\cos j\pi\right] e^{\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}R_1^2} . \qquad (3.40)$$

Таким образом, распределение температуры в продуктовой зоне между дисковыми пластинами в нулевом приближении на основании (3.38) и (3.40) примет следующий вид

$$T(r,z) = \frac{2}{\pi}\sum_{j=1}^{\infty}\frac{1}{j}\left[T_1 - T_3 - (T_1 - T_4)\cos j\pi\right] e^{\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}(R_1^2 - r^2)} \sin\frac{j\pi}{h} z + \\ + T_3 + \frac{z}{h}(T_4 - T_3) \,. \qquad (3.41)$$

Для нахождения первого приближения решения уравнения (3.25) подставим найденное решение нулевого приближения в ранее отброшенное слагаемое $\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}$ этого уравнения. После этого придем к неоднородному линейному уравнению в частных производных

$$-\frac{B}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \\ = \frac{2\pi}{Bh^2}\sum_{j=1}^{\infty} j\left[T_1 - T_3 - (T_1 - T_4)\cos j\pi\right]\left(1 - \frac{j^2\pi^2}{Bh^2} r^2\right) e^{\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}(R_1^2 - r^2)} \sin\frac{j\pi}{h} z \,. \qquad (3.42)$$

Будем искать решение этого уравнения в таком же виде, как и решение уравнения (3.35) нулевого приближения, т. е.

$$T(r,z) = \sum_{j=1}^{\infty} F_j(r) \sin\frac{j\pi}{h} z + T_3 - \frac{z}{h}(T_3 - T_4), \qquad (3.43)$$

где $F_j(r)$ - неизвестная пока функция, зависящая от координаты r и номера j собственных чисел λ из (3.32). Подстановкой выражения $T(r,z)$ из (3.43) в левую часть уравнения (3.42) и приравниванием коэффициентов при $\sin\frac{j\pi}{h} z$ в

левой и правой частях уравнения (3.42) получим обыкновенное линейное уравнение первого порядка относительно функции $F(r)$

$$\begin{aligned}&\frac{B}{r}\frac{dF_k}{dr}+\frac{j^2\pi^2}{h^2}F_k=\\&=-\frac{2\pi j}{Bh^2}\left[T_1-T_3-(T_1-T_4)\cos j\pi\right]\left(1-\frac{j^2\pi^2}{Bh^2}r^2\right)e^{\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}(R_1^2-r^2)}\end{aligned}. \tag{3.44}$$

Решением этого уравнения является функция

$$\begin{aligned}F_k(r)=&-\frac{2\pi j}{B^2h^2}\left[T_1-T_3-(T_1-T_4)\cos j\pi\right]\left(\frac{r^2}{2}-\frac{j^2\pi^2}{4Bh^2}r^4\right)e^{\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}(R_1^2-r^2)}+\\&+C_k^*e^{-\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}r^2}\end{aligned}, \tag{3.45}$$

где C_j^* − постоянная интегрирования.

На основании (3.43) и (3.45) имеем

$$\begin{aligned}T(r,z)=-\frac{\pi}{B^2h^2}\sum_{j=1}^{\infty}\Bigg\{&j\left[T_1-T_3-(T_1-T_4)\cos j\pi\right]\left(r^2-\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}r^4\right)e^{\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}(R_1^2-r^2)}+\\&+C_j^*e^{-\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}r^2}\Bigg\}\sin\frac{j\pi}{h}z+T_3-\frac{z}{h}(T_3-T_4).\end{aligned} \tag{3.46}$$

Постоянную интегрирования C_j^* находим так же, как и постоянную C_j для нулевого приближения, т. е. из условия $T(R_1,z)=T_1$. Точно так же, как и в равенстве (38) получим разложение функции, стоящей в левой части этого равенства в ряд Фурье по синусам. Из формулы для определения коэффициентов этого ряда находим

$$C_j^*=-j\left[T_1-T_3-(T_1-T_4)\cos j\pi\right]\left(\frac{2B^2h^2}{j^2\pi^2}+R_1^2-\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}R_1^4\right)e^{\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}R_1^2}. \tag{3.47}$$

Подставив данное выражение C_j^* в правую часть равенства (3.46) приведем его к виду

$$\begin{aligned}T(r,z)=-\frac{\pi}{B^2h^2}\sum_{j=1}^{\infty}\Bigg\{&j\left[T_1-T_3-(T_1-T_4)\cos j\pi\right]\left[r^2-R_1^2-\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}(r^4-R_1^4)-\frac{2B^2h^2}{j^2\pi^2}\right]\times\\&\times e^{\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}(R_1^2-r^2)}\sin\frac{j\pi}{h}z\Bigg\}+T_3-\frac{z}{h}(T_3-T_4).\end{aligned} \tag{3.48}$$

Формула (3.48) представляет решение уравнения (3.25) при граничных условиях (3.26) в первом приближении.

Таким образом, формула (3.48) может быть применена для расчета температуры охлаждения сгущенной молочной сыворотке при кристаллизации в ней лактозы, как при центральном способе её подачи, так и при периферийном способе подачи в продуктовую зону. В первом случае $R_1 < R_2$, $P_1 > P_2$, а во втором случае наоборот $R_1 > R_2$, $P_1 < P_2$.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛАКТОЗЫ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ В ПОТОКЕ

4.1. Структура, организация и объект исследования

Исследование поточного способа кристаллизации лактозы в молочной сыворотке проводили в экспериментальном цехе в ОАО «Учебно-опытный молочный завод» Вологодской государственной молочно-хозяйственной академии имени Н.В. Верещагина.

Объектом исследований являлся модельный растворiз восстановленной сухой молочной подсырной сыворотки с начальной температурой 60-65 ^{o}C и пластинчатый скребковый трехсекционный теплообменник.

Для приготовления модельного раствора использовали сухую молочную подсырную сыворотку. Модельный раствор готовили в резервуаре с теплообменной рубашкой и перемешивающим устройством.

Опыты проводили с раствором молочной подсырной сыворотки массовой долей сухих веществ 50-60 % и начальной температурой 60-65 °С. Диапазон массовой доли сухих веществ и начальной температуры модельного раствора подсырной молочной сыворотки был определён в соответствии с технологическим регламентом производства сухой молочной подсырной сыворотки.

Исследования закономерностей теплообмена при кристаллизации лактозы молочной сыворотки в пластинчатом скребковом теплообменном аппарате непрерывного действия проводили на экспериментальной установке.

Для экспериментального изучения кристаллизации лактозы в молочной сыворотке в потоке были проведены следующие исследования по определению: температуры массовой кристаллизации лактозы в зависимости от содержания сухих веществ; количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние; влияния частоты вращения рабочих органов РПА

на количество образующихся кристаллов и их средний размер, эффективности внесения затравки, а также зависимости среднего размера кристаллов лактозы от температуры нагревания, прошедшей предварительную кристаллизацию, сгущённой молочной сыворотки.

Экспериментальные исследования кристаллизации лактозы в молочной сыворотке в потоке проводили следующим образом. Подготовленный модельный раствор молочной подсырной сыворотки с начальной температурой 60-65 °С подавался в приемную ёмкость 1 экспериментальной установки (рис. 4.1). Далее насосом объемного действия 2 раствор молочной подсырной сыворотки подавался в первую секцию пластинчатого скребкового теплообменника 4, где охлаждался до температуры массовой кристаллизации лактозы и далее поступал в РПА 6. Перед подачей в РПА в охлажденную подсырную сыворотку насосом дозатором 9 через струйный смеситель 12 впрыскивалась взвесь пудры лактозы в растительном жире, в соотношении 1 к 5 от объема раствора. Струйный смеситель обеспечивал предварительное диспергирование взвеси в потоке сыворотки. В РПА сыворотка подвергалась интенсивному гидродинамическому воздействию, что обеспечивало гарантированно-равномерное распределение затравки (пудры лактозы) по всему объему обрабатываемого продукта. Кроме того, значительное гидродинамическое воздействие на пересыщенный раствор лактозы интенсифицировало процесс ее кристаллизации.

После РПА сыворотка поступала во вторую секцию охлаждения 5, где охлаждалась до температуры 12÷15 °С и затем поступала в буферную емкость 14.

После выдерживания сгущенная молочная сыворотка, прошедшая предварительную кристаллизацию, перекачивалась в третью секцию теплообменника 13, где нагревалась до температуры 37÷45 °С, после чего подавалась на сушку.

Для получения результатов опытов проводили отбор проб сгущенной молочной сыворотки. Пробы отбирали пробоотборниками, которые

установлены на выходе из первой секции пластинчатого скребкового теплообменника, после РПА и на выходе из второй секции пластинчатого скребкового теплообменника.

Отбор проб осуществляли в диапазоне исследованных температур и массовых долей сухих веществ в растворе сгущенной молочной сыворотки. В отобранных пробах определяли: количество кристаллов, средний размер кристаллов, процентное соотношение лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, и влияние на эти параметры частоты вращения рабочих органов РПА.

Кроме того, определяли по секциям пластинчатого скребкового теплообменника температуру охлаждения молочной сгущенной сыворотки, температуру хладоносителя при различной производительности пластинчатого скребкового теплообменника. Результаты экспериментальных исследований основных параметров кристаллизации приведены в Приложении 6.

4.2. Техника и методика проведения экспериментальных исследований

Для опытов использовали экспериментальную установку, производительностью до 300 кг/ч. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.1.

Основными частями экспериментальной установки являются пластинчатый скребковый теплообменник и РПА. Пластинчатый скребковый теплообменник непрерывного действия был выбран для реализации поточного способа кристаллизации лактозы в молочной сыворотке на основе предварительных исследований [18].

Пластинчатый скребковый теплообменник непрерывного действия представляет собой набор чередующихся теплообменных и так называемых продуктовых пластин, установленных и зажатых на специальных штангах.

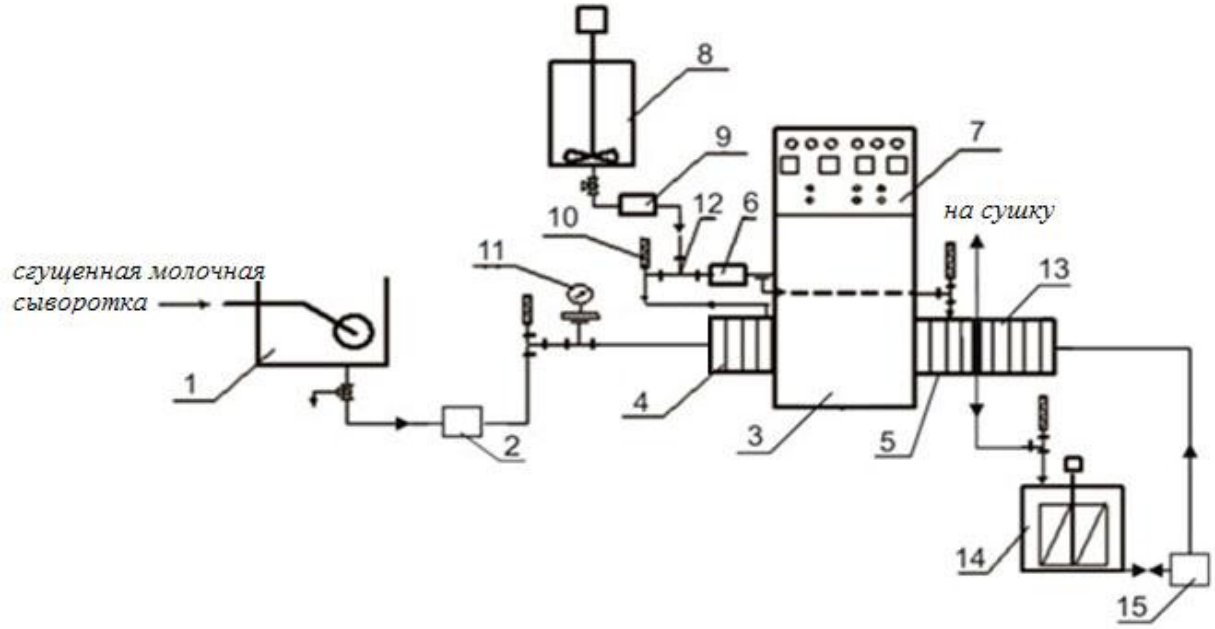
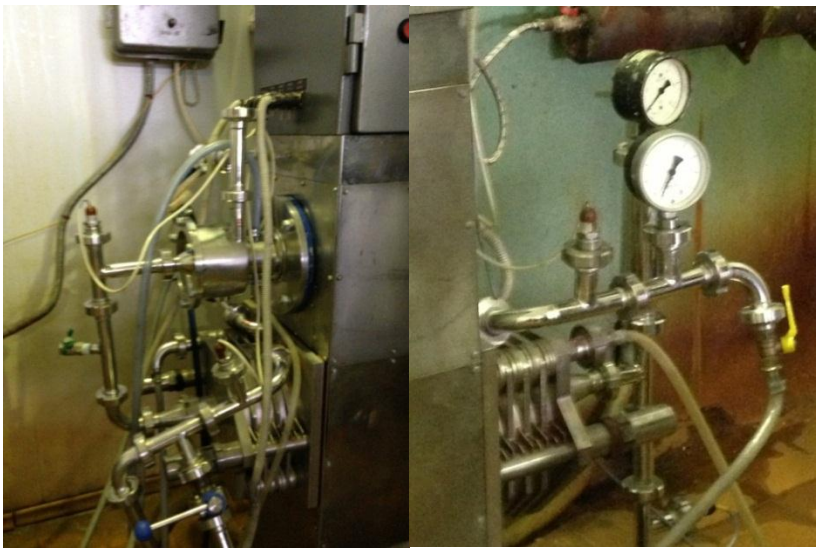


Рис. 4.1. Принципиальная схема экспериментальной установки:
1 – приёмный бак; 2 – насос подачи молочной сгущённой сыворотки; 3 – пластинчатый скребковый теплообменник; 4 – первая секция охлаждения; 5 – вторая секция охлаждения; 6 – РПА; 7 – щит управления; 8- ёмкость для затравки; 9 – насос-дозатор; 10 – термометры сопротивления; 11 – манометр с разделительной мембраной; 12 – струйный смеситель; 13 – секция нагрева; 14 – буферная ёмкость; 15 – насос подачи продукта на сушку.

Пластины теплообменника собраны в секции. Для изучения зависимости среднего размера кристаллов лактозы от температуры нагревания сгущённой молочной сыворотки в потоке, экспериментальная установка была модернизирована. Экспериментальный пластинчатый скребковый теплообменник был оснащён дополнительной секцией пластин. Эта секция была использована для нагрева сгущенной молочной сыворотки после кристаллизации в ней лактозы.

В дальнейшем для экспериментов был использован пластинчатый скребковый теплообменник, состоящий из трёх секций: секции нагрева и двух секций охлаждения.

а)



б)

Рис. 4.2. Общий вид системы управления:
а) – щит управления; 1 – измерители температуры; 2, 3 – регуляторы производительности насоса подачи молочной сгущённой сыворотки и РПА, соответственно; *б)* – узлы подключения составных частей экспериментальной установки;

В качестве теплоносителя для пластинчатого скребкового теплообменника для нагрева использовали горячую воду температурой 60°С, а охлаждения – хладоноситель –артезианскую воду с температурой 8 °С.

РПА непрерывного действия в экспериментальной установке представляет собой дисковый роторно-пульсационный аппарат. Рабочими органами РПА

является набор подвижных и неподвижных дисков. Подвижные и неподвижные диски имеют выступы со специальными проточками, которые позволяют интенсивно перемешивать и турбулизировать поток продукта.

Управление экспериментальной установкой осуществляли с помощью системы, состоящей из щита управления и узлов подключения её составных частей. Общий вид щита управления и узлов подключения составных частей экспериментальной установки показаны на рис. 4.2.

4.3. Методика обработки экспериментальных данных исследований

Для определения температуры массовой кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке был проведен комплекс исследований по определению доброкачественности молочной сыворотки, массовой доли лактозы в сгущённой молочной сыворотке и лактозного числа.

Массовая кристаллизация лактозы в сгущенной молочной сыворотке представляет собой процесс одновременного получения большого числа кристаллов из пересыщенного раствора[18].

Под температурой массовой кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке понимают значение температуры, при которой происходит данный процесс.

Определяющим показателем качества лактозосодержащего сырья является содержание лактозы, которое трактуется как доброкачественность (ДБ) или чистота (Ч) и определяется из соотношения

$$ДБ = \frac{Массоваядолялактозы\ (Л)}{Массоваядолясухихвеществ\ (СВ)} * 100. \quad (4.1)$$

В соответствии с принятой в свеклосахарном производстве терминологией доброкачественность выражают в единицах (ед.) [68, 32]

Доброкачественность традиционного лактозосодержащего сырья изменяется от высоких, приходящихся на мелассу рафинированного молочного сахара (85,6 %), до низких значений, характерных для соленой сыворотки (44,6 %) и образующейся при её использовании мелассы (50,8 %). Все остальные виды сырья

имеют доброкачественность на уровне подсырной и казеиновой сывороток (64,6-78,5 %) [68, 54, 55].

Доброкачественность сгущённой молочной сыворотки была принята из анализа исследований и по рекомендации доктора технических наук, профессора Гнездиловой А. И. [26]. Доброкачественность сгущенной молочной сыворотки была принята 70 %.

Массовую долю лактозы определяли из формулы (4.1) определения доброкачественности сгущённой молочной сыворотки [29]

$$Л = \frac{ДБ * СВ}{100}, \quad (4.2)$$

где ДБ – доброкачественность сгущённой молочной сыворотки, %; Л – массовая доля лактозы в сгущённой молочной сыворотке, %; СВ – массовая доля сухих веществ в сгущённой молочной сыворотке, %.

По полученному значению массовой доли лактозы в сгущенной молочной сыворотке определяли лактозное число по формуле [79]

$$Л_{ак.ч} = \frac{Л}{H_2O} * 100, \quad (4.3)$$

где $Л_{ак.ч}$ – лактозное число, %; Л - массовая доля лактозы в сгущённой молочной сыворотке, %;H_2O – массовая доля воды в сгущённой молочной сыворотке, %.

Температуру массовой кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке в исследованных диапазонах массовой доле сухих веществ определяли по значению массовой доле лактозы и используя график Гудзона (рис. 4.3.1) [29,26]. Более точно температуру определяют по критерию метастабильности на основе данных о вязкости продукта и растворимости лактозы в присутствии сахарозы [20].

По значению лактозного числа и, используя график Гудзона [29], определяли температуру массовой кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке в исследованных диапазонах массовой доли сухих веществ. Зависимость температуры массовой кристаллизации лактозы от массовой доли сухих веществ в сгущенной молочной сыворотке показана на рис. 4.4.

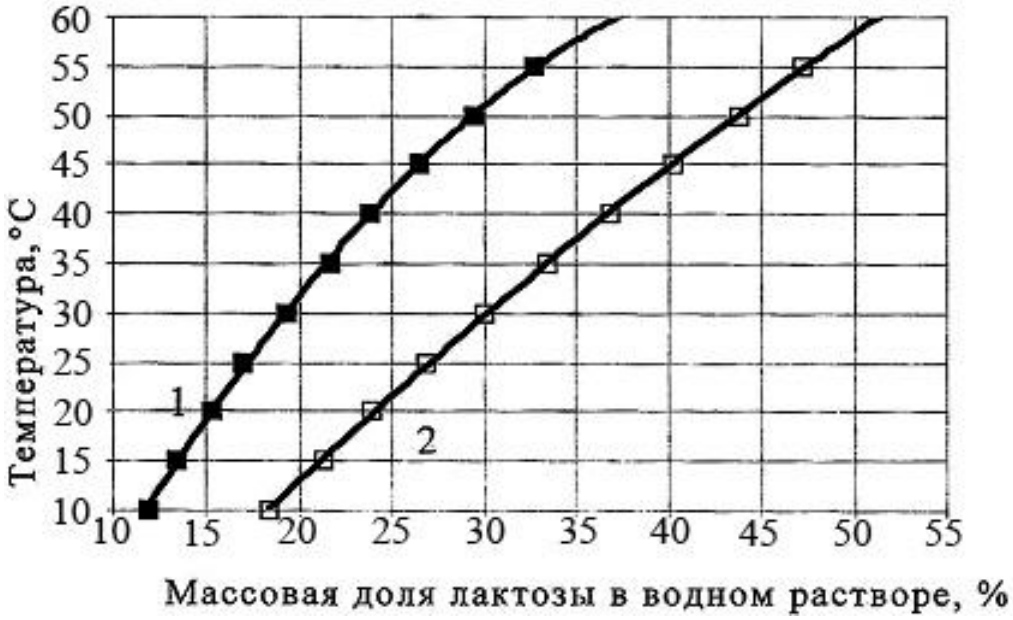


Рис. 4.3. Зависимость температуры от массовой доли лактозы в водном растворе: 1 – в насыщенном водном растворе; 2 – в пересыщенном водном растворе на границе метастабильности, определенной Гудзоном.

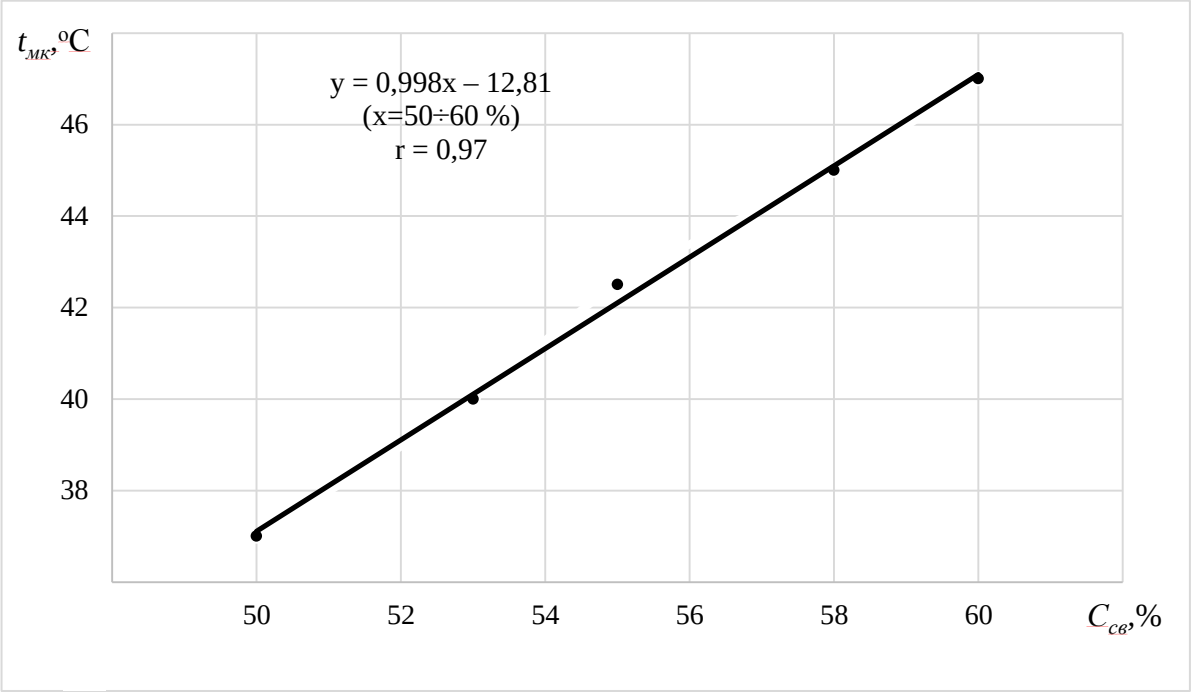


Рис. 4.4. Зависимость температуры массовой кристаллизации лактозы в молочной сыворотке от массовой доли сухих веществ

Для определения количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, брали пробы из начального и конечного раствора сгущенной молочной сыворотки. С помощью рефрактометра УРЛ-2 определяли количество сухих веществ. По формуле (4.2) определяли массовую долю лактозы в начальном и

конечном растворах сгущенной молочной сыворотки.

Далее по значениям начальной и конечной массовой доли лактозы в сгущенной молочной сыворотке определяли количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние по формуле [79]

$$Л_{кр} = \frac{100*(Л_{нач} - Л_{кон})}{100 - Л_{кон}}, \quad (4.4)$$

где $Л_{нач}$ – начальная массовая доля лактозы в сгущенной молочной сыворотке, %; $Л_{кон}$ – конечная массовая доля лактозы в сгущенной молочной сыворотке, %.

Для изучения образования кристаллов лактозы в молочной сыворотке были проведены опыты по определению количества кристаллов и их средний размер. Эти исследования были направлены на определение влияния температуры (охлаждения и нагревания) на количество и средний размер кристаллов, влияние частоты вращения рабочих органов РПА на кристаллообразование лактозы в сгущённой молочной сыворотке в потоке. Опыты проводили при охлаждении сгущённой молочной сыворотки с затравкой и без затравки.

Экспериментальное исследование образования кристаллов лактозы в молочной сыворотке проводили следующим образом. После выхода экспериментальной установки на режим для анализа отбирали пробы. Сгущенную молочную сыворотку отбирали из пробоотборников после РПА и после второй секции пластинчатого скребкового аппарата. Объем пробы составлял 100 мл.

Частота вращения рабочих органов РПА была выбрана на основе результатов предварительных исследований.

Для последующей сушки сгущенной молочной сыворотки изучена зависимость влияния температуры нагревания на средний размер кристаллов лактозы. Исследования проведены в диапазоне температуры 12 - 45 °С. Пробы сгущенной молочной сыворотки отбирали при температурах 12, 37 и 45 °С.

4.4. Результаты экспериментов

В теплообменнике непрерывного действия кристаллизация лактозы сыворотки происходит в сложных гидродинамических условиях.

Экспериментально определено влияние частоты вращения рабочих органов РПА на количество образующихся кристаллов лактозы и их средний размер. Частота вращения рабочих органов РПА изменялась в процессе исследований от 9,6 $с^{-1}$ до 16 $с^{-1}$. Результаты влияния частоты вращения рабочих органов РПА на количество кристаллов в сгущенной молочной сыворотке *К* представлены на рис.4.5.

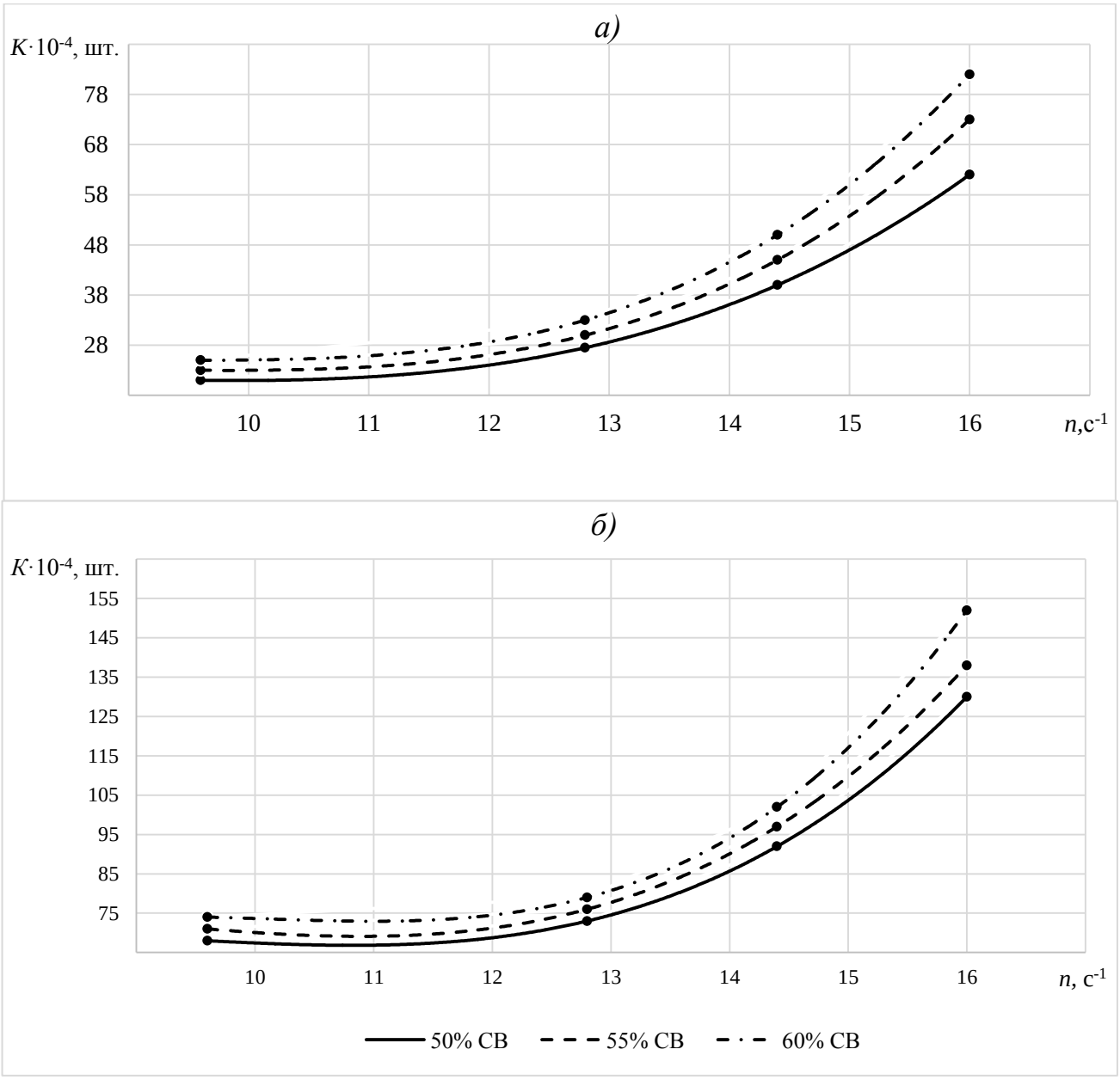
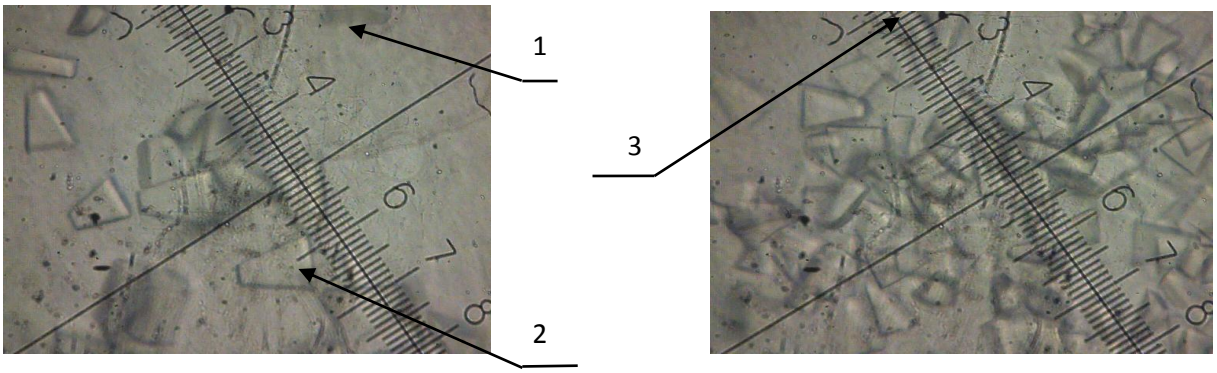


Рис.4.5. Зависимость количества кристаллов в сгущенной молочной сыворотке от частоты вращения рабочих органов РПА:
а) после РПА; *б)* на выходе из второй секции.

Определено, что в пробе сыворотки после РПА количество кристаллов в 1,5 раза меньше чем на выходе из второй секции аппарата. Это объясняется тем, что

сыворотка во второй секции продолжает охлаждаться и идёт образование новых кристаллов. Микрофотографии кристаллов лактозы после РПА и на выходе из второй секции аппарата показаны на рис. 4.6.



а) *б)*

Рис. 4.6. Микрофотографии кристаллов лактозы сыворотки:
а) после РПА; *б)* на выходе из второй секции аппарата: 1 – меласса; 2 – кристалл; 3 – линейка.

Определено, что в пробе сыворотки после РПА количество кристаллов в 1,5 раза меньше чем на выходе из второй секции аппарата. Это объясняется тем, что сыворотка во второй секции продолжает охлаждаться и идёт образование новых кристаллов.

Влияние частоты вращения рабочих органов РПА исследовано также на средний размер кристаллов. Анализ опытов (рис. 4.7) показывает, что с увеличением частоты вращения рабочих органов РПА очевидно уменьшение среднего размера кристаллов лактозы при разной массовой доле сухих веществ. При прохождении через РПА средний размер кристаллов уменьшается от 8,3 мкм до 6,6 мкм, при массовой доли сухих веществ 60 %. Дальнейшее уменьшение среднего размера кристаллов во второй секции происходит за счет быстрого охлаждения продукта. Средний размер кристаллов за время нахождения во второй секции уменьшается от 6,6 мкм до 5,2 мкм.

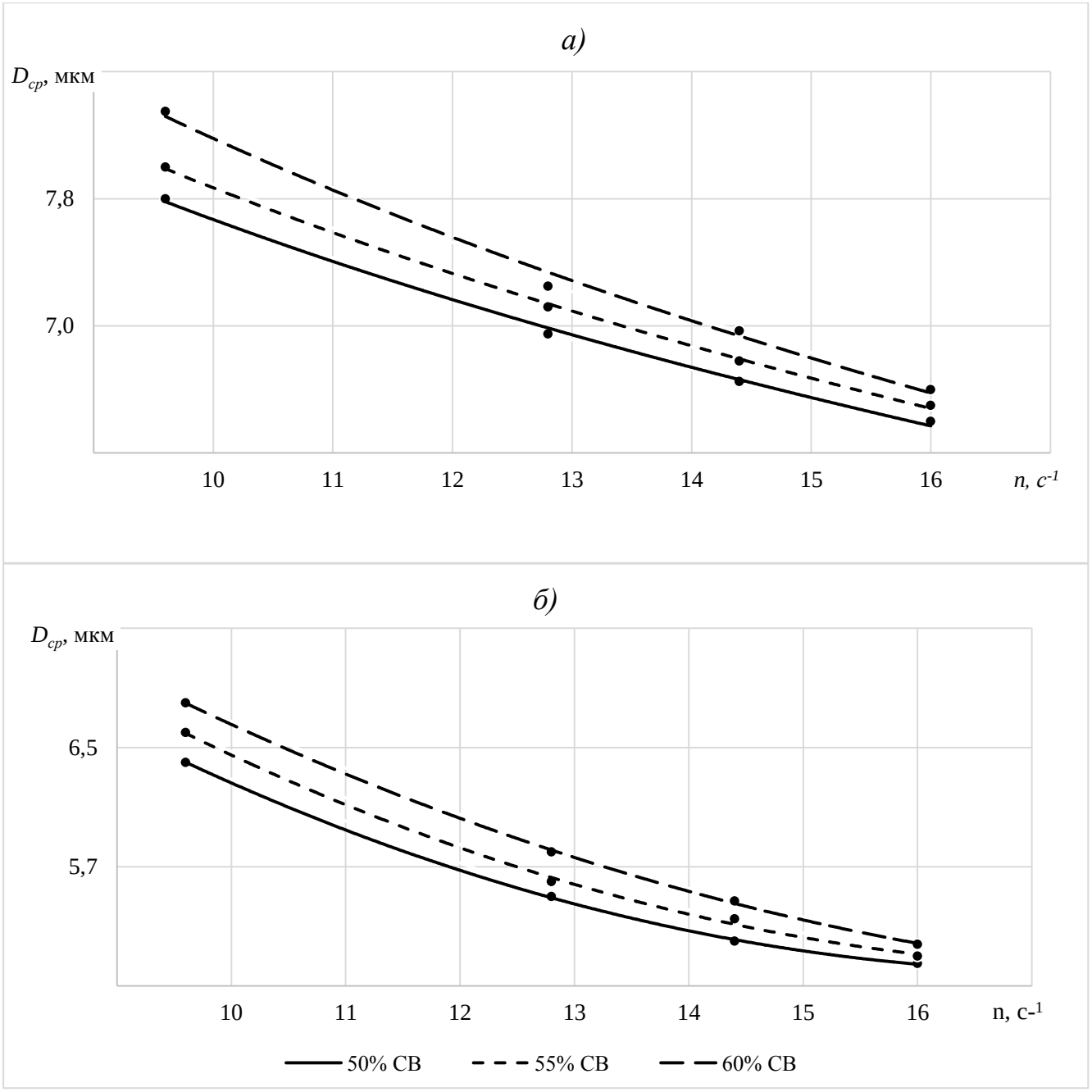
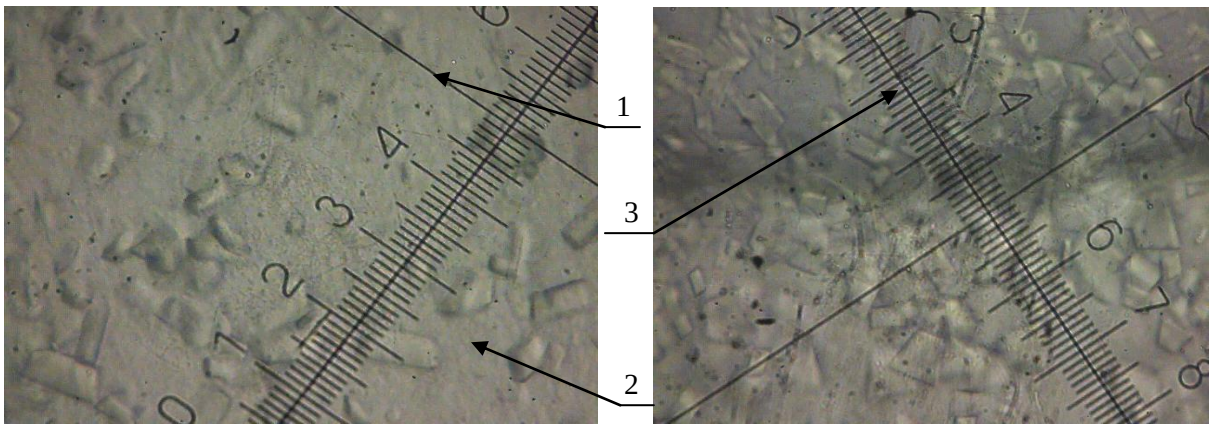


Рис.4.7. Зависимость среднего размера кристаллов в сгущенной молочной сыворотке от частоты вращения рабочих органов РПА:
а) после РПА; *б)* на выходе из второй секции;

На обоих графиках видно, что при увеличении частоты вращения рабочих органов РПА средний размер кристаллов уменьшается. На рис. 4.8. представлены микрофотографии среднего размера кристаллов после РПА и на выходе из второй секции.



а) *б)*

Рис. 4.8. Зависимость среднего размера кристаллов в сгущенной молочной сыворотке от частоты вращения рабочих органов РПА:
а) после РПА; *б)* на выходе из второй секции: 1 – меласса; 2 – кристалл; 3 – линейка;

Температура является одним из важных параметров, влияющих как на образование кристаллов лактозы в сыворотке, так и на их растворимость. Были проведены исследования влияния температуры (рис. 4.9) на количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние.

Для определения количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, брали пробы из начального и конечного раствора сгущенной молочной сыворотки. С помощью рефрактометра УРЛ-2 определяли количество сухих веществ. По формуле (4.4.) определяли массовую долю лактозы в начальном и конечном растворах сгущенной молочной сыворотки.

Из полученной начальной и конечной массовой доли лактозы в растворе определяли количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние

$$\text{Вых. прод} = \frac{100*(Л_{нач}-Л_{кон})}{100-Л_{кон}}, \quad (4.4)$$

где $Л_{нач}$ – начальная массовая доля лактозы в растворе, %; $Л_{кон}$ – конечная массовая доля лактозы в растворе, %.

Опыты были проведены с внесением затравки и без. Результаты исследований приведены в таблице 4.1. Как видно из таблицы значительной разницы по количеству лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, не

наблюдается, в связи с этим можно сделать практический вывод о том, что нет необходимости вносить затравку и это экономически важно для проведения процесса кристаллизации в промышленных условиях.

Таблица 4.1

количество кристаллизовавшейся лактозы, %								
$C_{СВ}$, % / t, °С	с затравкой				без затравки			
	12	**37**	**37**	**60**	**12**	**37**	**37**	**60**
50	37	11	7	0	36,9	10,8	7,0	0,0
55	50	12	8	0	50,0	11,9	8,0	0,0
60	64	13	9	0	63.7	13,0	8,8	0,0

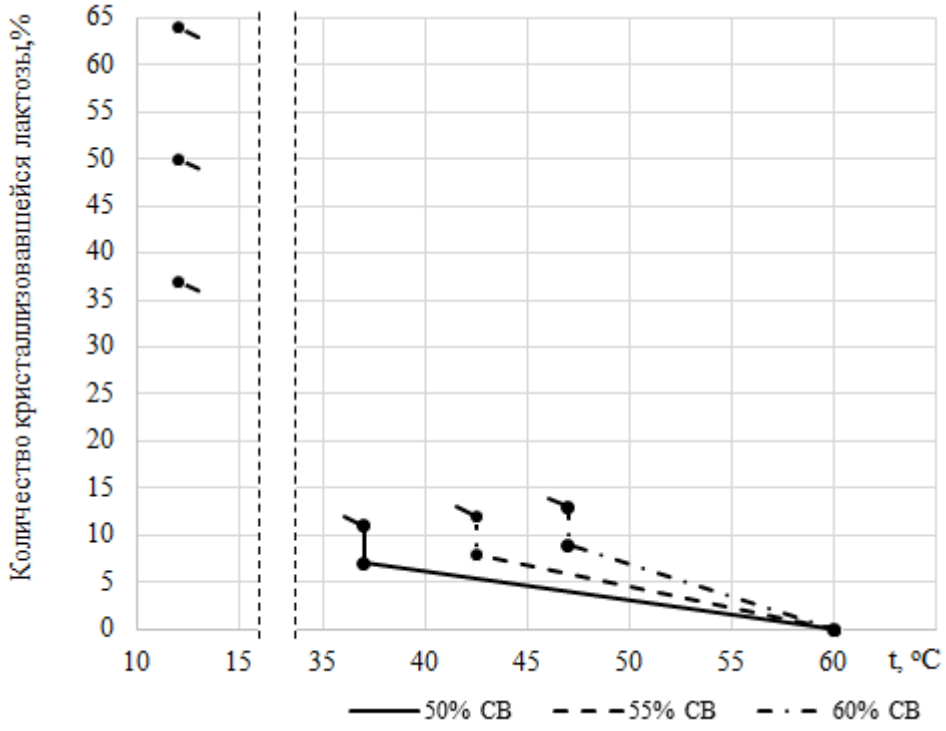


Рис.4.9. Зависимость количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, от температуры

Исследованиями предусматривалось два этапа предварительной кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке: охлаждение до температуры 37-38 °С с последующей подачей на сушку в потоке; охлаждение сыворотки в кристаллизаторе до температуры 12 ° С, после этого сыворотка собирается в буферной емкости. Из буферной емкости сыворотка подается в третью секцию нагревания, где нагревается до температуры 40-45 °С и далее

сгущенная молочная сыворотка подается на сушку.

Исследовано влияние температуры нагревания сыворотки на средний размер кристаллов лактозы. Результаты приведены на рис. 4.10.

На графике видно, что при увеличении температуры нагревания средний размер кристаллов становится меньше. Это можно объяснить тем, что в процессе нагревания кристаллы растворяются и соответственно размер кристаллов становиться меньше.

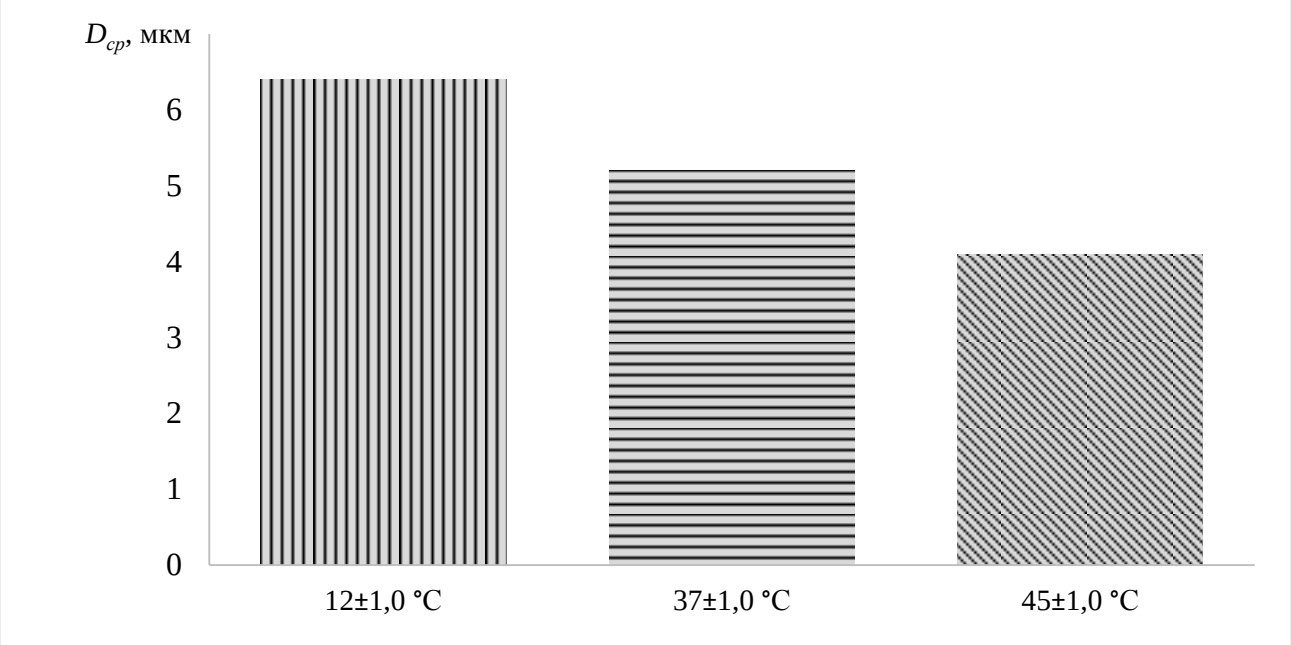
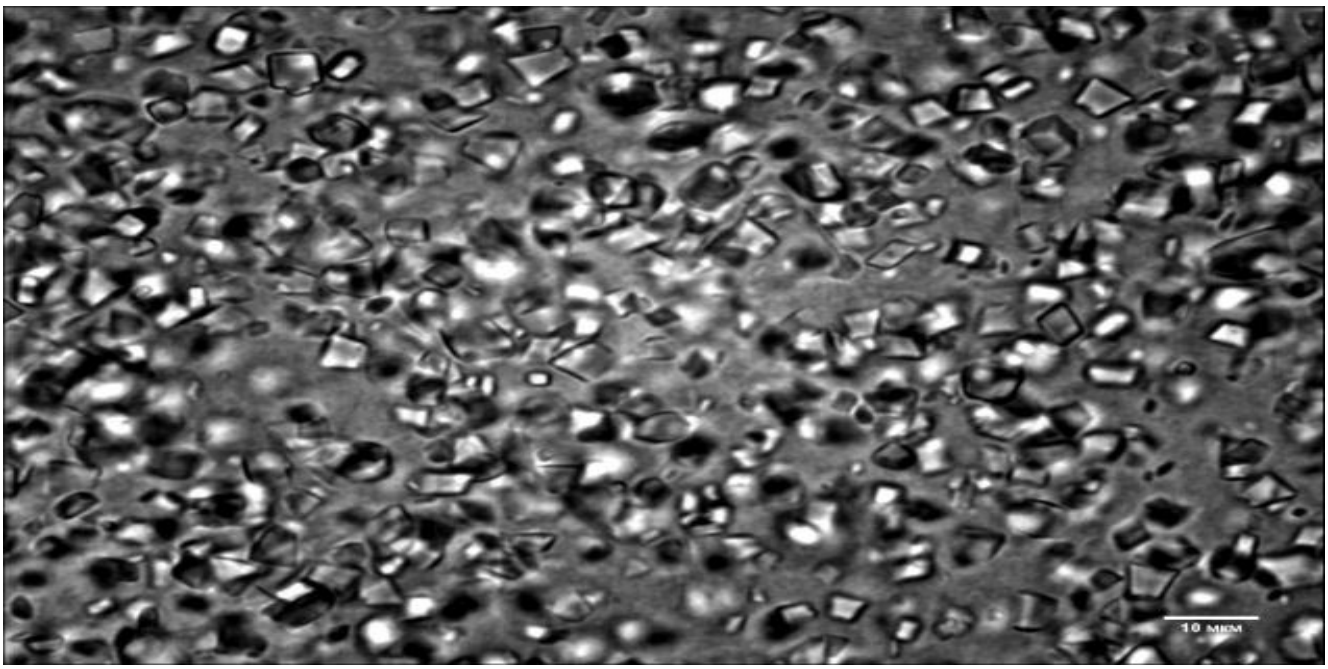


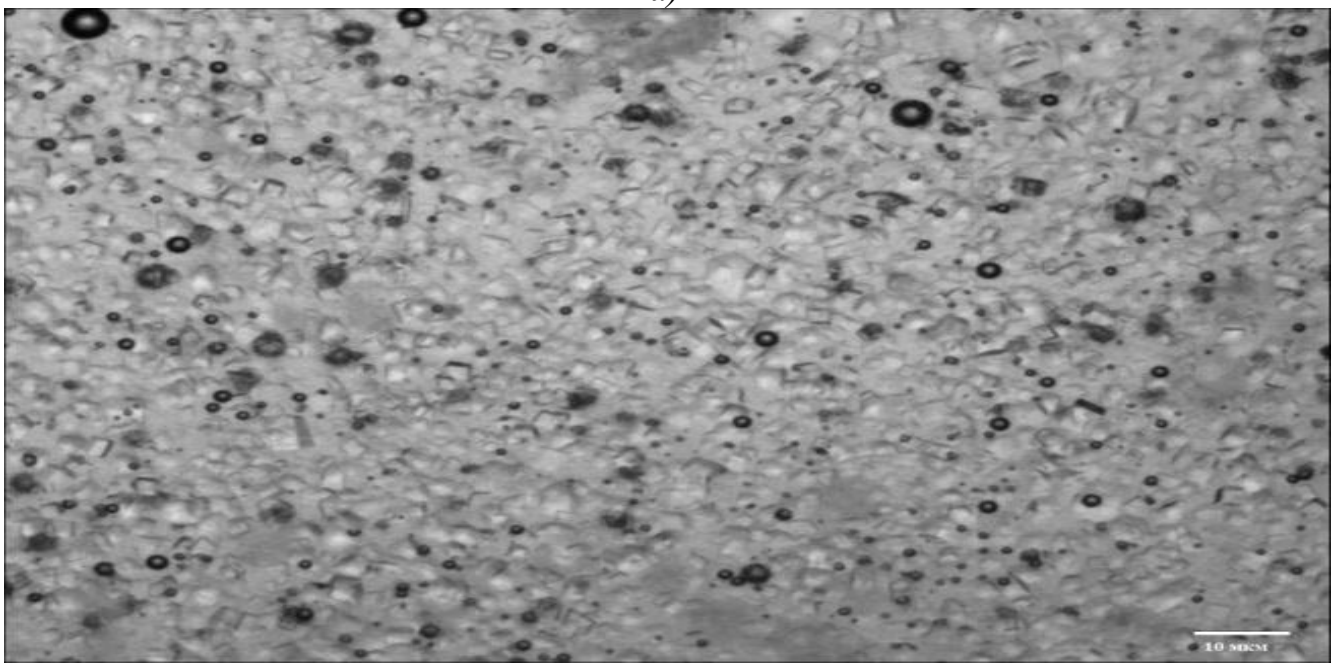
Рис.4.10. Зависимость среднего размера кристаллов от температуры нагревания

Показано, что нагрев сыворотки, после кристаллизации в ней лактозы(12^{o}С), до температуры 35-38^{o}С, приводит к незначительному уменьшению размеров кристалла в среднем с 6,6 мкм до 5,2 мкм. Это позволяет сделать вывод, что в технологии сухой молочной сыворотки, перед сушкой сыворотку можно предварительно подогревать (до 40-45^{o}С), без существенного уменьшения среднего размера кристаллов лактозы (30-35%). При нагревании до 37 ^{o}С происходит уменьшение среднего размера кристаллов не более чем на 20-25 %.

На рис. 4.11. наглядно представлены изменения размеров кристаллов от температуры нагревания.



а)



б)

Рис.4.11. Фотографии изменения размеров кристаллов в зависимости от температуры нагревания:
а) при 12 ^{o}C; *б)* при 45 ^{o}C;

ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Методика инженерного расчёта пластинчатого скребкового теплообменника для кристаллизации лактозы сгущённой молочной сыворотки в потоке

Пластинчатый скребковый теплообменник непрерывного действия используется для реализации поточного способа кристаллизации лактозы сгущённой молочной сыворотки. Для выбора рациональной конструкции теплопередающей поверхности разработана методика его инженерного расчёта.

Основной целью инженерного расчёта является определение площади теплопередающей поверхности аппарата. Площадь теплопередающей поверхности аппарата определяется произведением площади одной теплообменной пластины на их количество. Количество теплообменных пластин зависит от температуры массовой кристаллизации лактозы при определённом значении массовой доли сухих веществ в сгущённой молочной сыворотке. Температура массовой кристаллизации лактозы и температура на выходе из аппарата является заданной величиной.

Для расчета температуры сгущённой молочной сыворотке на выходе из каждой теплообменной пластины необходимо определить температуры стенок дисковых пластины, а затем температуру сгущённой молочной сыворотки. Расчет количества теплообменных пластин завершаем после достижение заданной температуры сгущённой молочной сыворотки на выходе из аппарата.

Исследовано изменение температуры сгущённой молочной сыворотки и хладоносителя при охлаждении её в пластинчатом скребковом теплообменнике непрерывного действия. Теплообменник представляет собой набор чередующихся теплообменных пластин. Набор последовательно соединенных пластин образует теплопередающую поверхность аппарата для охлаждения сгущённой молочной сыворотки до температуры массовой кристаллизации лактозы.

Теплообменные пластины в аппарате устанавливают последовательно, образуя поверхность теплообмена с каналами, по которым движется продукт. В зависимости от конструкции теплообменныепластины могут быть с центральной и периферийной подачей сгущённой молочной сыворотке в них [61].

Для расчета пластинчатого скребкового теплообменника для кристаллизации лактозы сгущённой молочной сыворотки в потоке, состоящего из набора теплообменных пластин, работающих последовательно, следует задаться перепадом давления (или расходом) и температурами сгущённой молочной сыворотки на входе и на выходе. По этим данным подбираются геометрические параметры теплообменных пластин и их количество. При этом принимается, что геометрия каждой теплообменной пластины одинакова.

Из рассмотренной выше теоретической части следует, что режим охлаждения сгущённой молочной сыворотки в каждой теплообменной пластине принят одинаковым и не зависит от способа подачи сгущённой молочной сыворотки (центральный или периферийный) в эту пластину. Этот вывод следует из применяемой для теоретических расчетов системы гидродинамических и тепловых уравнений (уравнения (3.2), (3.3.)) и граничных условий (3.18), (3.19), (3.27), которые математически будут формулироваться одинаково для каждой теплообменной пластины.

Однако, каждая теплообменная пластина должна рассчитываться, исходя из своих конкретных численных значений граничных условий (температура на входе и температуры охлаждающих стенок). По этой причине непосредственное применение формулы (3.48) для практических расчетов малопригодно, так как нужно знать температуру сгущённой молочной сыворотки на входе в каждую теплообменную пластину и температуру стенок дисковых пластин в этой теплообменной пластине.

В связи с этим расчет пластинчатого скребкового теплообменника для кристаллизации лактозы сгущённой молочной сыворотки в потоке будет состоять из двух основных этапов: первый этап – определение температуры стенок каждой

теплообменной пластины аппарата и второй этап – определение температуры сгущённой молочной сыворотки на выходе из аппарата.

Температура стенок теплообменной пластины (температура дисковых пластин), или температура хладоносителя не может быть рассчитана аналитически ввиду сложности канала, по которому течет хладоноситель. Поэтому найдем её приближенно, считая, что она одинакова на всех стенках даннойтеплообменной пластины.

Для этого используем формулу аналогичную формуле В.Г. Шухова применимую для расчета температуры жидкости, текущей в круглой прямой трубе с нагретыми стенками [71]

$$T_{xi} = \frac{T_{1i} + T_{2i}}{2} + \left(T_{x,i-1} - \frac{T_{1i} + T_{2i}}{2} \right) e^{-\beta \frac{l}{h}}, \tag{5.1}$$

где

$$\beta = \frac{2SK}{c_p \rho q_x}, \tag{5.2}$$

l – средняя длина канала для хладоносителя в каждой теплообменной пластине, S – средняя площадь сечения канала для хладоносителя в каждой теплообменной пластине, K – коэффициент теплопередачи через стенку (дисковой пластиной) между хладоносителяи сгущённой молочной сывороткой, ρ – плотность хладоносителя, c_p – теплоемкость хладоносителя при постоянном давлении, T_{1i} и T_{2i} – соответственно температура сгущённой молочной сывороткойна входе в элемент с номером i, и температура сгущённой молочной сывороткой на выходе из этого элемента, $T_{x,i-1}$ – температура хладоносителя на входе в i - тый элемент, $\frac{T_{1i} + T_{2i}}{2}$ – средняя температура сгущённой молочной сыворотки в каждой теплообменной пластине, q_x – расход хладоносителя.

Коэффициент β не может быть рассчитан по формуле (5.2) поскольку для каналов сложной формы коэффициент теплопередачи K может быть определен

только экспериментально. Поэтому определим весь комплекс $-\frac{\beta l}{h}$, входящий множителем в показатель экспоненты (5.1), задавшись температурой хладоносителя в какой-либо теплообменной пластине.

Проще всего это сделать для первой теплообменной пластины $i=1$ (нумерация теплообменных пластин по ходу течения сгущённой молочной сыворотки). При этом учтем, что течение хладоносителя может быть как в сторону течения сгущённой молочной сыворотки (прямоток), так и противоположно этому течению (противоток). Тогда для первой теплообменной пластины можно записать $T_{x1}=T_{x0}\pm\Delta$, где $T_{x1}-$ средняя температура хладоносителя в первом теплообменной пластине, $T_{x0}-$ температура хладоносителя на входе в первую теплообменную пластину (при прямотоке) или на выходе из первой теплообменной пластины (при противотоке), $\Delta-$ разность температур хладоносителя в первой теплообменной пластине на входе (выходе) из неё, которую можно найти экспериментально. Знак плюс соответствует случаю прямотока, а знак минус − случаю противотока.

Для определения комплекса $-\frac{\beta l}{h}$ получим из (5.1) следующее уравнение

$$T_{x0}\pm\Delta=\frac{T_{11}+T_{21}}{2}+\left(T_{x0}-\frac{T_{11}+T_{21}}{2}\right)e^{-\beta\frac{l}{h}}, \tag{5.3}$$

в котором температура сгущённой молочной сыворотки T_{21} на выходе из первойтеплообменной пластине рассчитывается по формуле (47) при $r=R_2$, $T_3=T_4=T_{x1}=T_{x0}\pm\Delta$, $T_1=T_{11}$ и осреднении функций, зависящих от z по толщине зазора между дисками.

Из уравнения (5.3) находим

$$-\beta\frac{l}{h}=\ln\left(1\pm\frac{2\Delta}{2T_{x0}-T_{11}-T_{21}}\right). \tag{5.4}$$

На основании (5.4) формула (3.48) примет вид

$$T_{xi} = \frac{T_{1i} + T_{2i}}{2} + \left(T_{x,i-1} - \frac{T_{1i} + T_{2i}}{2} \right) \left(1 \pm \frac{2\Delta}{2T_{x0} - T_{11} - T_{21}} \right). \qquad (5.5)$$

Таким образом, по формуле (5.5) можно приближенно найти температуру стенок для теплообменных пластин $i = 1, 2, \ldots N$.

Преобразуем теперь формулу (3.48) так, чтобы с ее помощью можно было бы найти температуру сгущённой молочной сыворотки на выходе из любойтеплообменной пластины. Для этого допустим, что температура всех стенок данной теплообменной пластины с номером i примерно одинакова и определяется по формуле (5.5).

Тогда в (3.48) следует предположить, что $T_3 = T_4 = T_{xi}$, $T_1 = T_{1i}$, а истинную температуру в каждой точке теплообменной пластины заменить средней температурой по толщине зазора между дисковыми пластинами при радиусе $r = R_2$, т. е. $T(r, z) \approx T_{2i}$, где T_{1i} и T_{2i} − соответственно температура сгущённой молочной сыворотки на входе в теплообменную пластину с номером i, и температура сгущённой молочной сыворотки на выходе из этой теплообменной пластины.

После этого преобразованная формула примет следующий вид

$$T_{2i} = -\frac{\pi}{B^2 h^2} \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ j\left[(T_{1i} - T_{xi})(1 - \cos j\pi) \right] \left[R_2{}^2 - R_1^2 - \frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}(R_2{}^4 - R_1^4) - \frac{2B^2 h^2}{j^2 \pi^2} \right] \times \right.$$
$$\left. \times e^{\frac{j^2\pi^2}{2Bh^2}(R_1^2 - R_2{}^2)} \frac{1 - \cos j\pi}{j\pi} \right\} + T_{xi}. \qquad (5.6)$$

По этой формуле (5.6) последовательно подсчитывается температура на выходе из любой теплообменной пластине, начиная с первой по ходу течения сгущённой молочной сыворотки.

Подсчет прекращается для такого $i = N$, при котором температура сгущённой молочной сывороткина выходе из этой теплообменной пластины станет равной заданной конечной температуре T_{2N}. Следует иметь в виду, что температура сгущённой молочной сыворотки на выходе из любой теплообменной

пластины T_{2i} присутствует как в равенстве (5.5), так и в равенстве (5.6). Поэтому ее определение будет связано с решением системы уравнений (5.5) и (5.6). В равенство (5.6) вместо T_{xi} подставляется правая часть (5.5) и решается уравнение относительно T_{2i}, при этом температура T_{1i} на входе в теплообменную пластинус номером i равна температуре сгущённой молочной сыворотки на выходе из предыдущей $i-1$ теплообменной пластины.

5.2. Пример инженерного расчёта

Расчёт площади теплопередачи пластинчатого скребкового теплообменника непрерывного действия проведём в следующей последовательности. По формуле (5.6) последовательно подсчитываем температуру на выходе из любой теплообменной пластине, начиная с первой по ходу течения сгущённой молочной сыворотки. Подсчет прекращаем для такой теплообменной пластины $i = N$, при котором температура сгущённой молочной сыворотки на выходе из этой теплообменной пластины станет равной заданной конечной температуре T_{2N}.

Пример расчета площади теплопередачи для первой и второй секций пластинчатого скребкового теплообменника непрерывного действия по схеме противотока выполнен: для первой секции последующим данным $T_1 = 55^{\circ}C$, $T_{2N} = 35^{\circ}C$, $T_{x0} = 12^{\circ}C$, $R_1 = 0{,}04\,м$, $R_2 = 0{,}2\,м$, $h = 0{,}015\,м$, $a = 10^{-7}\,м^2/с$, $k = 42\,Па \cdot с$, $n = 0{,}84$, $q = 2{,}8 \cdot 10^{-4}\,м^3/с$. $\Delta = 1{,}5^{\circ}C$., и для второй секции последующим данным $T_1 = 38^{\circ}C$, $T_{2N} = 12^{\circ}C$, $T_{x0} = 13^{\circ}C$, $R_1 = 0{,}04\,м$, $R_2 = 0{,}2\,м$, $h = 0{,}015\,м$, $a = 10^{-7}\,м^2/с$, $k = 42\,Па \cdot с$, $n = 0{,}84$, $q = 2{,}8 \cdot 10^{-4}\,м^3/с$, $\Delta = 1{,}2^{\circ}C$.

Численные расчеты проведены в прикладном вычислительном пакете MATHCAD. Пример и результаты расчёта приведены далее.

Расчет числа охлаждающих элементов в первой секции охлаждения для концентрации сухих веществ 50% и кратности хладоносителя 2

Исходные данные

$T1 := 55 \quad Tx0 := 16 \quad T2N := 38 \quad R1 := 0.04 \quad R2 := 0.2 \quad h := 0.015$

$a := 10^{-7} \quad \Delta := 1.8 \quad q := 2.8 \cdot 10^{-4} \quad n := 0.84 \quad k := 30.4$

$$\Delta p := \left[\frac{q \cdot (1 + 2 \cdot n)}{4 \cdot \pi \cdot h \cdot n}\right]^{n} \cdot \frac{\left[k \cdot \left(R2^{1-n} - R1^{1-n}\right)\right]}{\left(\frac{h}{2}\right)^{n+1} \cdot (1 - n)} = 3.023 \times 10^{3}$$

$$f := 2 \cdot \frac{n}{1 + 2 \cdot n} \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^{\frac{1+n}{n}} \cdot \left[\frac{\Delta p \cdot (1 - n)}{k \cdot \left(R2^{1-n} - R1^{1-n}\right)}\right]^{\frac{1}{n}}$$

$$B := \frac{f}{a} \qquad B = 2.971 \times 10^{4}$$

$m := 100 \qquad T11 := T1$

Вычисления температуры выхода из элемента с номером i и температуры охладителя на стенках этого элемента

1. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 1 (i=1)

$Tx1 := Tx0 - \Delta$

$$T21 := -\frac{\pi}{B^2 \cdot h^2} \cdot \sum_{j=1}^{m} \left[j \cdot [T1 - Tx1 - (T1 - Tx1) \cdot \cos(j \cdot \pi)] \cdot \left[R2^2 - R1^2 - \frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R2^4 - R1^4\right) - \frac{2 \cdot \left(B^2 \cdot h^2\right)}{j^2 \cdot \pi^2}\right] \cdot e^{\frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R1^2 - R2^2\right)} \cdot \left(\frac{1 - \cos(j \cdot \pi)}{j \cdot \pi}\right)\right] + Tx1$$

$T21 = 50.065 \quad i := 1$

$$\varepsilon := \frac{2\cdot\Delta}{2\cdot Tx0 - T11 - T21} \quad Tx1 := \frac{T11 + T21}{2} + \left(Tx0 - \frac{T11 + T21}{2}\right)\cdot(1 - \varepsilon)$$

$$Tx1 = 14.2 \qquad \varepsilon = -0.049$$

2. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 2 (i=2)

$$T12 := T21$$

$$f(T22) := T22 + \frac{\pi}{B^2\cdot h^2}\cdot\sum_{j=1}^{m}\left[j\cdot\left[T21 - \left[\frac{T12 + T22}{2} + \left(Tx1 - \frac{T12 + T22}{2}\right)\cdot(1 - \varepsilon)\right]\right]\right.$$

$$\cdot\frac{(1 - \cos(j\cdot\pi))^2}{(j\cdot\pi)}\cdot\left[R2^2 - R1^2 - \frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R2^4 - R1^4\right) - \frac{2\cdot\left(B^2\cdot h^2\right)}{j^2\cdot\pi^2}\right]\cdot$$

$$\left.\cdot e^{\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R1^2 - R2^2\right)}\right] - \left[\frac{T12 + T22}{2} + \left(Tx1 - \frac{T12 + T22}{2}\right)\cdot(1 - \varepsilon)\right]$$

$$T22 := 50$$

$$soln := root(f(T22), T22)$$

$$soln = 45.527$$

$$T22 := soln$$

$$Tx2 := \frac{T12 + T22}{2} + \left(Tx1 - \frac{T12 + T22}{2}\right)\cdot(1 - \varepsilon)$$

$$Tx2 = 12.434$$

3. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 3 (i=3)

$$T13 := T22$$

$$f(T23) := T23 + \frac{\pi}{B^2 \cdot h^2} \cdot \sum_{j=1}^{m} \left[j \cdot \left[T22 - \left[\frac{T13 + T23}{2} + \left(Tx2 - \frac{T13 + T23}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right] \right] \cdot \right.$$

$$\left. \cdot \frac{(1 - \cos(j \cdot \pi))^2}{(j \cdot \pi)} \cdot \left[R2^2 - R1^2 - \frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R2^4 - R1^4 \right) - \frac{2 \cdot \left(B^2 \cdot h^2 \right)}{j^2 \cdot \pi^2} \right] \cdot \right.$$

$$\left. \cdot e^{\frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R1^2 - R2^2 \right)} \right] - \left[\frac{T13 + T23}{2} + \left(Tx1 - \frac{T13 + T23}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right]$$

$T23 := 45$

$soln := root(f(T23), T23)$

$soln = 43.187$

$T23 := soln$

$$Tx3 := \frac{T13 + T23}{2} + \left(Tx2 - \frac{T13 + T23}{2} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \Delta}{2 \cdot Tx0 - T11 - T21} \right)$$

$Tx3 = 10.817$

4. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 4 (i=4)

$T14 := T23$

$$f(T24) := T24 + \frac{\pi}{B^2 \cdot h^2} \cdot \sum_{j=1}^{m} \left[j \cdot \left[T23 - \left[\frac{T14 + T24}{2} + \left(Tx3 - \frac{T14 + T24}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right] \right] \cdot \right.$$

$$\cdot\frac{(1-\cos(j\cdot\pi))^2}{(j\cdot\pi)}\cdot\left[R2^2-R1^2-\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R2^4-R1^4\right)-\frac{2\cdot\left(B^2\cdot h^2\right)}{j^2\cdot\pi^2}\right]\cdot$$

$$e^{\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R1^2-R2^2\right)}\Bigg]-\left[\frac{T14+T24}{2}+\left(Tx3-\frac{T14+T24}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]$$

$T24 := 40$

$soln := root(f(T24), T24)$

$soln = 39.091$

$T24 := soln$

$$Tx4 := \frac{T14+T24}{2}+\left(Tx3-\frac{T14+T24}{2}\right)\cdot\left(1-\frac{2\cdot\Delta}{2\cdot Tx0-T11-T21}\right)$$

$Tx4 = 9.323$

5. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 5 (i=5)

$T15 := T24$

$$f(T25) := T25+\frac{\pi}{B^2\cdot h^2}\cdot\sum_{j=1}^{m}\left[j\cdot\left[T24-\left[\frac{T15+T25}{2}+\left(Tx4-\frac{T15+T25}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]\right]\cdot\right.$$

$$\left.\cdot\frac{(1-\cos(j\cdot\pi))^2}{(j\cdot\pi)}\cdot\left[R2^2-R1^2-\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R2^4-R1^4\right)-\frac{2\cdot\left(B^2\cdot h^2\right)}{j^2\cdot\pi^2}\right]\right.\cdot$$

$$\cdot e^{\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R1^2-R2^2\right)}\Bigg] - \left[\frac{T15+T25}{2} + \left(Tx4 - \frac{T15+T25}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]$$

$T25 := 35$

$soln := root(f(T25), T25)$

$soln = 35.324$

$T25 := soln$

$$Tx5 := \frac{T15+T25}{2} + \left(Tx4 - \frac{T15+T25}{2}\right)\cdot\left(1 - \frac{2\cdot\Delta}{2\cdot Tx0 - T11 - T21}\right)$$

$Tx5 = 7.949$

Количество охлаждающих элементов в первой секции охлаждения для концентрации сухих веществ 50% и кратности хладоносителя 2 равняется 5 шт.

Температура выхода из первой секции охлаждения для концентрации сухих веществ 50% и кратности хладоносителя 2 равняется 35,32 °С.

Расчет числа охлаждающих элементов во второй секции охлаждения для концентрации сухих веществ 50% и кратности хладоносителя 3

Исходные данные

$T1 := 38 \quad Tx0 := 16 \quad T2N := 12 \quad R1 := 0.04 \quad R2 := 0.2 \quad h := 0.015$

$a := 12.8\cdot10^{-8} \quad \Delta := 1.8 \quad q := 2.8\cdot10^{-4} \quad n := 0.84 \quad k := 42$

$$\Delta p := \left[\frac{q\cdot(1+2\cdot n)}{4\cdot\pi\cdot h\cdot n}\right]^n \cdot \frac{\left[k\cdot\left(R2^{1-n} - R1^{1-n}\right)\right]}{\left(\frac{h}{2}\right)^{n+1}\cdot(1-n)} = 4.177\times10^3$$

$$f := 2\cdot\frac{n}{1+2\cdot n}\cdot\left(\frac{h}{2}\right)^{\frac{1+n}{n}}\cdot\left[\frac{\Delta p\cdot(1-n)}{k\cdot\left(R2^{1-n}-R1^{1-n}\right)}\right]^{\frac{1}{n}}$$

$$B := \frac{f}{a} \qquad B = 2.321\times 10^{4}$$

$$m := 100 \qquad T11 := T1$$

Вычисления температуры выхода из элемента с номером i и температуры охладителя на стенках этого элемента

1. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 1 (i=1)

$$Tx1 := Tx0 - \Delta$$

$$T21 := -\frac{\pi}{B^2\cdot h^2}\cdot\sum_{j=1}^{m}\left[j\cdot[T1 - Tx1 - (T1 - Tx1)\cdot\cos(j\cdot\pi)]\cdot\right.$$

$$\cdot\left[R2^2 - R1^2 - \frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R2^4 - R1^4\right) - \frac{2\cdot\left(B^2\cdot h^2\right)}{j^2\cdot\pi^2}\right]\cdot$$

$$\left.\cdot e^{\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R1^2-R2^2\right)}\cdot\left(\frac{1-\cos(j\cdot\pi)}{j\cdot\pi}\right)\right] + Tx1$$

$$T21 = 34.743$$

$$\varepsilon := \frac{2\cdot\Delta}{2\cdot Tx0 - T11 - T21}$$

$$Tx1 := \frac{T11+T21}{2} + \left(Tx0 - \frac{T11+T21}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)$$

$$Tx1 = 14.2$$

$$\varepsilon = -0.088$$

2. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 2 (i=2)

$$T12 := T21$$

$$f(T22) := T22 + \frac{\pi}{B^2 \cdot h^2} \cdot \sum_{j=1}^{m} \left[j \cdot \left[T21 - \left[\frac{T12 + T22}{2} + \left(Tx1 - \frac{T12 + T22}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right] \right] \cdot \right.$$

$$\left. \cdot \frac{(1 - \cos(j \cdot \pi))^2}{(j \cdot \pi)} \cdot \left[R2^2 - R1^2 - \frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R2^4 - R1^4 \right) - \frac{2 \cdot \left(B^2 \cdot h^2 \right)}{j^2 \cdot \pi^2} \right] \right.$$

$$\left. \cdot e^{\frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R1^2 - R2^2 \right)} \right] - \left[\frac{T12 + T22}{2} + \left(Tx1 - \frac{T12 + T22}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right]$$

$$T22 := 40$$

$$soln := root(f(T22), T22)$$

$$soln = 31.702$$

$$T22 := soln$$

$$Tx2 := \frac{T12 + T22}{2} + \left(Tx1 - \frac{T12 + T22}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon)$$

$$Tx2 = 12.153$$

3. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 3 (i=3)

$$T13 := T22$$

$$f(T23) := T23 + \frac{\pi}{B^2 \cdot h^2} \cdot \sum_{j=1}^{m} \left[j \cdot \left[T22 - \left[\frac{T13 + T23}{2} + \left(Tx2 - \frac{T13 + T23}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right] \right] \cdot \right.$$

$$\cdot\frac{(1-\cos(j\cdot\pi))^2}{(j\cdot\pi)}\cdot\left[R2^2-R1^2-\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R2^4-R1^4\right)-\frac{2\cdot\left(B^2\cdot h^2\right)}{j^2\cdot\pi^2}\right]\cdot$$

$$e^{\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R1^2-R2^2\right)}\Bigg]-\left[\frac{T13+T23}{2}+\left(Tx1-\frac{T13+T23}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]$$

$T23 := 35$

$soln := root(f(T23), T23)$

$soln = 31.023$

$T23 := soln$

$$Tx3 := \frac{T13+T23}{2}+\left(Tx2-\frac{T13+T23}{2}\right)\cdot\left(1-\frac{2\cdot\Delta}{2\cdot Tx0-T11-T21}\right)$$

$Tx3 = 10.28$

4. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 4 (i=4)

$T14 := T23$

$$f(T24) := T24+\frac{\pi}{B^2\cdot h^2}\cdot\sum_{j=1}^{m}\left[j\cdot\left[T23-\left[\frac{T14+T24}{2}+\left(Tx3-\frac{T14+T24}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]\right]\cdot\right.$$

$$\cdot\frac{(1-\cos(j\cdot\pi))^2}{(j\cdot\pi)}\cdot\left[R2^2-R1^2-\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R2^4-R1^4\right)-\frac{2\cdot\left(B^2\cdot h^2\right)}{j^2\cdot\pi^2}\right]\cdot$$

$$\left.e^{\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R1^2-R2^2\right)}\right]-\left[\frac{T14+T24}{2}+\left(Tx3-\frac{T14+T24}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]$$

$T24 := 30$

$$soln := root(f(T24), T24)$$

$$soln = 27.952$$

$$T24 := soln$$

$$Tx4 := \frac{T14 + T24}{2} + \left(Tx3 - \frac{T14 + T24}{2}\right)\cdot\left(1 - \frac{2\cdot\Delta}{2\cdot Tx0 - T11 - T21}\right)$$

$$Tx4 = 8.582$$

5. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 5 (i=5)

$$T15 := T24$$

$$f(T25) := T25 + \frac{\pi}{B^2\cdot h^2}\cdot\sum_{j=1}^{m}\left[j\cdot\left[T24 - \left[\frac{T15 + T25}{2} + \left(Tx4 - \frac{T15 + T25}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]\right]\cdot\right.$$

$$\frac{(1-\cos(j\cdot\pi))^2}{(j\cdot\pi)}\cdot\left[R2^2 - R1^2 - \frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R2^4 - R1^4\right) - \frac{2\cdot\left(B^2\cdot h^2\right)}{j^2\cdot\pi^2}\right]\cdot$$

$$\left.\cdot e^{\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R1^2 - R2^2\right)}\right] - \left[\frac{T15 + T25}{2} + \left(Tx4 - \frac{T15 + T25}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]$$

$$T25 := 30$$

$$soln := root(f(T25), T25)$$

$$soln = 25.085$$

$$T25 := soln$$

$$Tx5 := \frac{T15 + T25}{2} + \left(Tx4 - \frac{T15 + T25}{2}\right)\cdot\left(1 - \frac{2\cdot\Delta}{2\cdot Tx0 - T11 - T21}\right)$$

$$Tx5 = 6.998$$

6. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 6 (i=6)

$$T16 := T25$$

$$f(T26) := T26 + \frac{\pi}{B^2 \cdot h^2} \cdot \sum_{j=1}^{m} \left[j \cdot \left[T25 - \left[\frac{T16 + T26}{2} + \left(Tx5 - \frac{T16 + T26}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right] \right] \cdot \frac{(1 - \cos(j \cdot \pi))^2}{(j \cdot \pi)} \cdot \left[R2^2 - R1^2 - \frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R2^4 - R1^4 \right) - \frac{2 \cdot \left(B^2 \cdot h^2 \right)}{j^2 \cdot \pi^2} \right] \cdot e^{\frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R1^2 - R2^2 \right)} \right] - \left[\frac{T16 + T26}{2} + \left(Tx5 - \frac{T16 + T26}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right]$$

$$T26 := 30$$

$$soln := root(f(T26), T26)$$

$$soln = 22.407$$

$$T26 := soln$$

$$Tx6 := \frac{T16 + T26}{2} + \left(Tx5 - \frac{T16 + T26}{2} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \Delta}{2 \cdot Tx0 - T11 - T21} \right)$$

$$Tx6 = 5.518$$

7. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 7 (i=7)

$$T17 := T26$$

$$k := 56.9$$

$$\Delta p := \left[\frac{q \cdot (1 + 2 \cdot n)}{4 \cdot \pi \cdot h \cdot n} \right]^n \cdot \frac{\left[k \cdot \left(R2^{1-n} - R1^{1-n} \right) \right]}{\left(\frac{h}{2} \right)^{n+1} \cdot (1 - n)} = 5.659 \times 10^3$$

$$f := 2\cdot\frac{n}{1+2\cdot n}\cdot\left(\frac{h}{2}\right)^{\frac{1+n}{n}}\cdot\left[\frac{\Delta p\cdot(1-n)}{k\cdot\left(R2^{1-n}-R1^{1-n}\right)}\right]^{\frac{1}{n}}$$

$$B := \frac{f}{a} \qquad B = 2.321\times 10^{4}$$

$$f(T27) := T27 + \frac{\pi}{B^2\cdot h^2}\cdot\sum_{j=1}^{m}\left[j\cdot\left[T26-\left[\frac{T17+T27}{2}+\left(Tx6-\frac{T17+T27}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]\right]\cdot\right.$$

$$\left.\frac{(1-\cos(j\cdot\pi))^2}{(j\cdot\pi)}\cdot\left[R2^2-R1^2-\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R2^4-R1^4\right)-\frac{2\cdot\left(B^2\cdot h^2\right)}{j^2\cdot\pi^2}\right]\cdot\right.$$

$$\left.e^{\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R1^2-R2^2\right)}\right]-\left[\frac{T17+T27}{2}+\left(Tx6-\frac{T17+T27}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]$$

$T27 := 25$

$soln := root(f(T27), T27)$

$soln = 19.907$

$T27 := soln$

$$Tx7 := \frac{T17+T27}{2}+\left(Tx6-\frac{T17+T27}{2}\right)\cdot\left(1-\frac{2\cdot\Delta}{2\cdot Tx0-T11-T21}\right) \qquad Tx7 = 4.136$$

8. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 8 (i=8)

$T18 := T27$

$$f(T28) := T28 + \frac{\pi}{B^2\cdot h^2}\cdot\sum_{j=1}^{m}\left[j\cdot\left[T27-\left[\frac{T18+T28}{2}+\left(Tx7-\frac{T18+T28}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]\right]\cdot\right.$$

$$\cdot\frac{(1-\cos(j\cdot\pi))^2}{(j\cdot\pi)}\cdot\left[R2^2-R1^2-\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R2^4-R1^4\right)-\frac{2\cdot\left(B^2\cdot h^2\right)}{j^2\cdot\pi^2}\right]\cdot$$

$$\left.\cdot e^{\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R1^2-R2^2\right)}\right]-\left[\frac{T18+T28}{2}+\left(Tx7-\frac{T18+T28}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]$$

$T28 := 20$

$soln := root(f(T28), T28)$

$soln = 17.572$ $\quad$ $T28 := soln$

$$Tx8 := \frac{T18+T28}{2}+\left(Tx7-\frac{T18+T28}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon) \qquad Tx8 = 2.845$$

9. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 9 (i=9)

$T19 := T28$

$$f(T29) := T29+\frac{\pi}{B^2\cdot h^2}\cdot\sum_{j=1}^{m}\left[j\cdot\left[T28-\left[\frac{T19+T29}{2}+\left(Tx8-\frac{T19+T29}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]\right]\cdot\right.$$

$$\cdot\frac{(1-\cos(j\cdot\pi))^2}{(j\cdot\pi)}\cdot\left[R2^2-R1^2-\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R2^4-R1^4\right)-\frac{2\cdot\left(B^2\cdot h^2\right)}{j^2\cdot\pi^2}\right]\cdot$$

$$\left.\cdot e^{\frac{j^2\cdot\pi^2}{2\cdot B\cdot h^2}\cdot\left(R1^2-R2^2\right)}\right]-\left[\frac{T19+T29}{2}+\left(Tx8-\frac{T19+T29}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon)\right]$$

$T29 := 20$

$soln := root(f(T29), T29)$

$soln = 15.392$ $\quad$ $T29 := soln$

$$Tx9 := \frac{T19+T29}{2}+\left(Tx8-\frac{T19+T29}{2}\right)\cdot(1-\varepsilon) \qquad Tx9 = 1.437$$

10. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 10 (i=10)

$T110 := T29$

$$f(T210) := T210 + \frac{\pi}{B^2 \cdot h^2} \cdot \sum_{j=1}^{m} \left[j \cdot \left[T29 - \left[\frac{T110 + T210}{2} + \left(Tx9 - \frac{T110 + T210}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right] \right] \cdot \frac{(1 - \cos(j \cdot \pi))^2}{(j \cdot \pi)} \cdot \left[R2^2 - R1^2 - \frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R2^4 - R1^4 \right) - \frac{2 \cdot \left(B^2 \cdot h^2 \right)}{j^2 \cdot \pi^2} \right] \cdot e^{\frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R1^2 - R2^2 \right)} \right] - \left[\frac{T110 + T210}{2} + \left(Tx9 - \frac{T110 + T210}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right]$$

$T210 := 20$

$soln := root(f(T210), T210)$

$soln = 13.326$ $\quad$ $T210 := soln$

$$Tx10 := \frac{T110 + T210}{2} + \left(Tx9 - \frac{T110 + T210}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \qquad Tx10 = 0.295$$

11. Вычисление температуры выхода из элемента с номером 11 (i=11)

$T111 := T210$

$$f(T211) := T211 + \frac{\pi}{B^2 \cdot h^2} \cdot \sum_{j=1}^{m} \left[j \cdot \left[T210 - \left[\frac{T111 + T211}{2} + \left(Tx10 - \frac{T111 + T211}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right] \right] \cdot \frac{(1 - \cos(j \cdot \pi))^2}{(j \cdot \pi)} \cdot \left[R2^2 - R1^2 - \frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R2^4 - R1^4 \right) - \frac{2 \cdot \left(B^2 \cdot h^2 \right)}{j^2 \cdot \pi^2} \right] \cdot e^{\frac{j^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot B \cdot h^2} \cdot \left(R1^2 - R2^2 \right)} \right] - \left[\frac{T111 + T211}{2} + \left(Tx10 - \frac{T111 + T211}{2} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \right]$$

$T211 := 20$

$soln := root(f(T211), T211)$

$soln = 11.397$ $\quad$ $T211 := soln$

$$Tx11 := \frac{T111 + T211}{2} + \left(Tx10 - \frac{T111 + T211}{2}\right)\cdot(1 - \varepsilon)$$

Количество охлаждающих элементов во второй секции охлаждения для концентрации сухих веществ 50% и кратности хладоносителя 2 равняется 11 шт.

Температура выхода из первой секции охлаждения для концентрации сухих веществ 50% и кратности хладоносителя 2 равняется 11,39 °С.

5.3. Определение площади теплопередачи пластинчатого скребкового теплообменника непрерывного действия

Определяющим признаком пластинчатого скребкового теплообменника является конструкция его теплопередающей поверхности. Теплообменная пластина является основным элементом разборной теплопередающей поверхности вместе со средствами уплотнения и другими вспомогательными деталями. Принцип построения пластинчатого скребкового теплообменника непрерывного действия состоит в том, что пластины одинакового размера располагают в пространстве параллельно друг другу, образуя требуемую площадь теплопередачи.

В аппаратах данного типа используют штампованные пластины, разработанные специалистами НПО «Мир-Продмаш»[122].

Конструкции пластин унифицированы. Это позволяет составлять аппараты с различной по величине поверхностью теплопередачи, причём большие площади в довольно ограниченном объеме.

Теплообменные пластины в аппарате устанавливают последовательно, образуя поверхность теплопередачи с каналами, по которым движется охлаждаемый или нагреваемый продукт. Особенностью конструкции теплообменных пластин также является то, что подача охлаждаемого или нагреваемого продукта в пространство между пластинами, может быть организована как из центрального отверстия, так и из отверстий, расположенных на периферии дисков [62, 79].

Площадь теплопередачи пластинчатого скребкового теплообменника непрерывного действия для кристаллизации лактозы молочной сыворотки в потоке можно находить не только аналитически, но и графическими методами расчёта с помощью номограмм.

Номограммой называется чертёж, графически выражающий определённое уравнение и позволяющий без дополнительных вычислений и вспомогательной литературы сразу находить искомую величину или вариант с определёнными параметрами. Особенность расчёта с помощью номограмм заключается в том, что каждый чертёж изображает заданную область изменения переменных, и каждое из значений переменных в этой области изображено на номограмме определённым геометрическим элементом (точкой или линией); изображения значения переменных, связанных функциональной зависимостью, находятся на номограмме в определённом соответствии, общем для номограмм одного и того же типа. [7].

Проведённые исследования позволили разработать номограммы для определения площади теплопередачи пластинчатого скребкового теплообменника непрерывного действия при кристаллизации лактозы молочной сыворотки. Разработанные номограммы представлены далее. На рис. 5.1-5.3 приведены номограммы для определения площади теплопередачи первой секции, а на рис. 5.4-5.6 для второй секции пластинчатого скребкового теплообменника непрерывного действия.

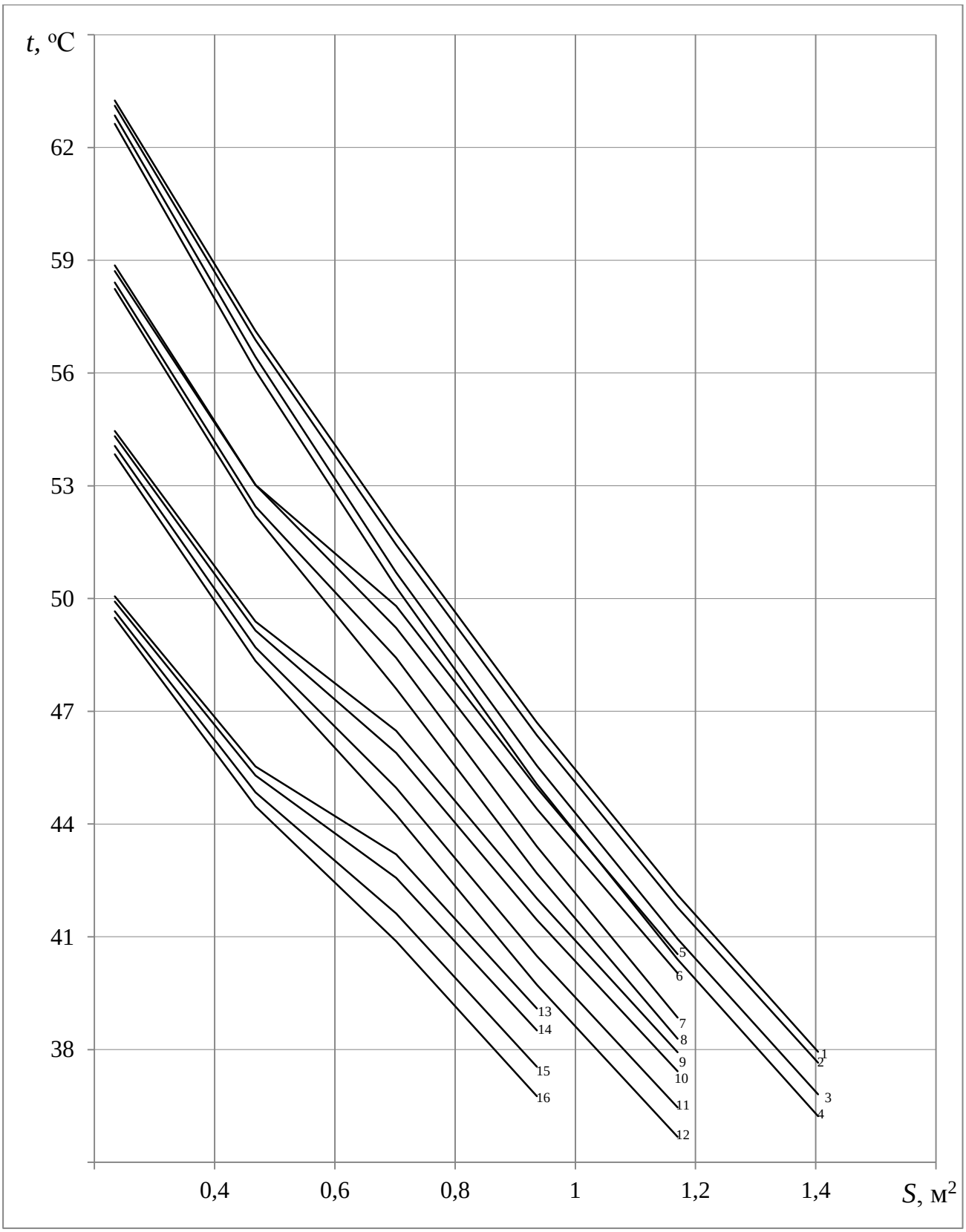


Рис. 5.1. Номограмма для определения площади теплопередачи скребкового теплообменника при массовой доле сухих веществ 50 % в молочной сыворотке, начальной температуре 55-70 °С, и кратности хладоносителя: ***2***- кривые 1,5,9,13; ***2,5*** - 2,6,10,14; ***3***- 3,7,11,15; **4** - 4,8,12,16

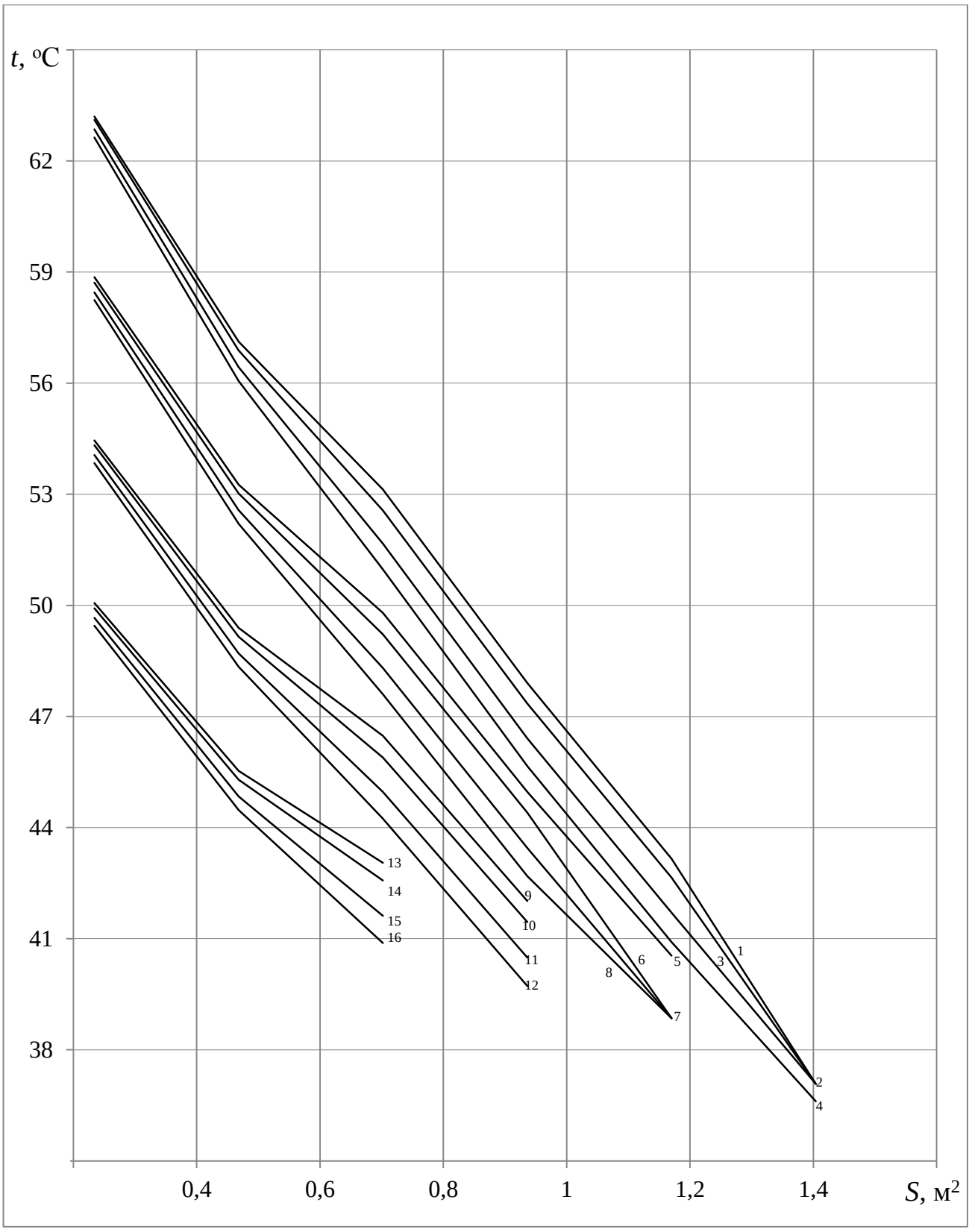


Рис. 5.2. Номограмма для определения площади теплопередачи скребкового теплообменника при массовой доле сухих веществ 55 % в молочной сыворотке, начальной температуре 55-70 °С, и кратности хладоносителя: ***2*** - кривые 1,5,9,13; ***2,5*** - 2,6,10,14; ***3*** - 3,7,11,15; ***4*** - 4,8,12,16

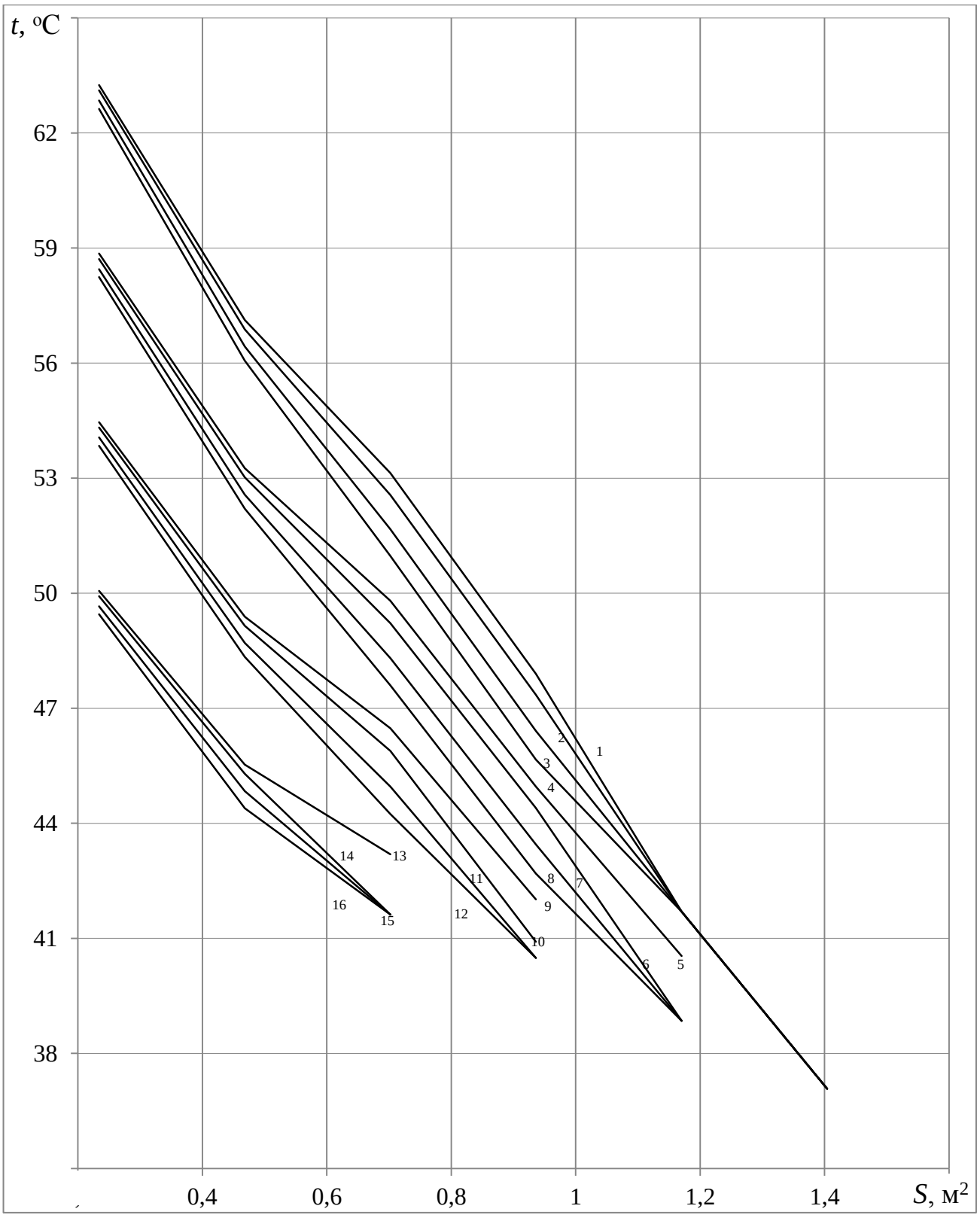


Рис. 5.3. Номограмма для определения площади теплопередачи скребкового теплообменника при массовой доле сухих веществ 60 % в молочной сыворотки, начальной температуре 55-70 °С, и кратности хладоносителя: ***2*** - кривые 1,5,9,13; ***2,5*** - 2,6,10,14; ***3*** - 3,7,11,15; ***4*** - 4,8,12,16

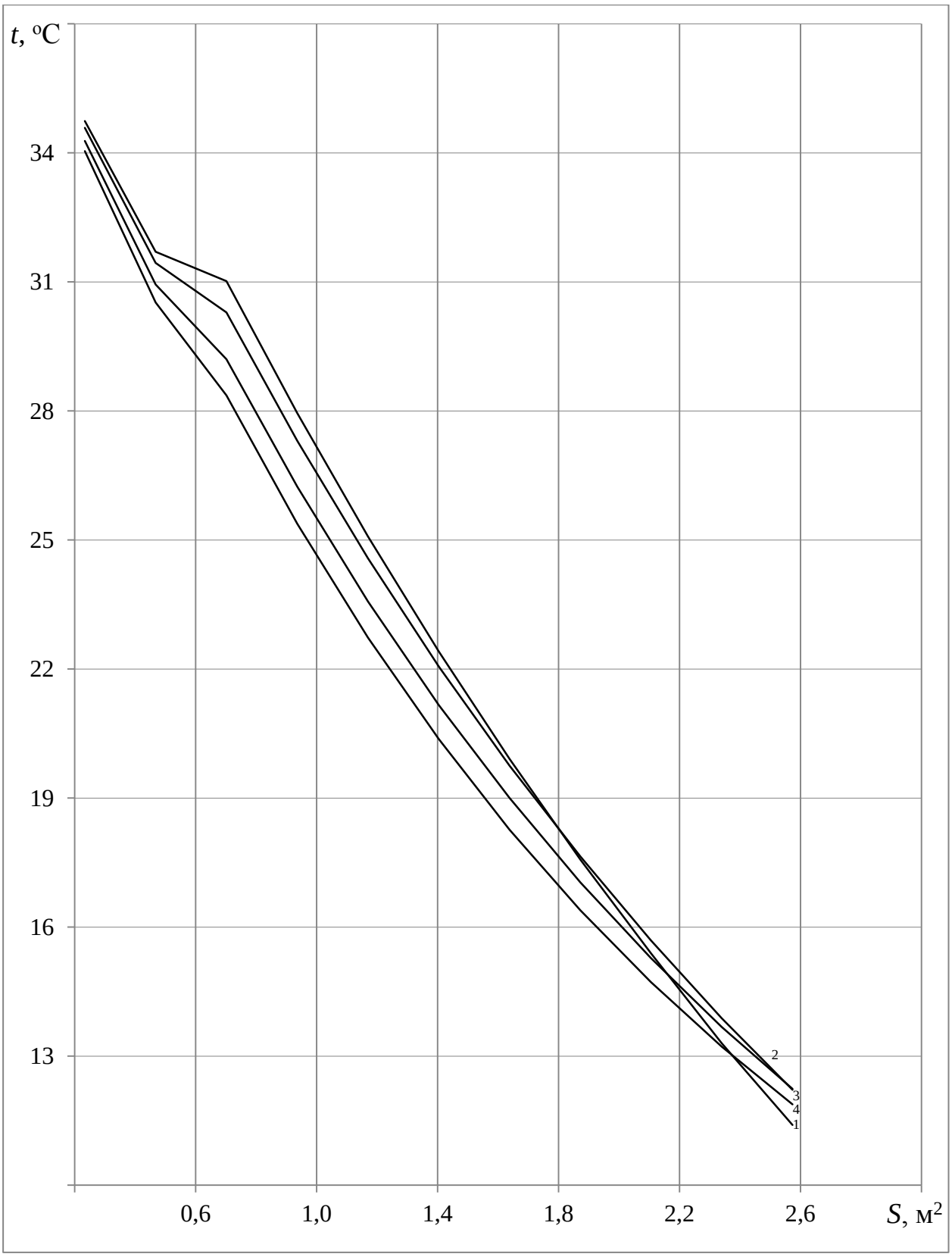


Рис. 5.4. Номограмма для определения площади теплопередачи скребкового теплообменника при массовой доле сухих веществ 50 % в молочной сыворотке, начальной температуре 38 °С, и кратности хладоносителя: ***2*** - кривые 1; ***2,5*** - 2; ***3*** - 3; ***5*** - 4

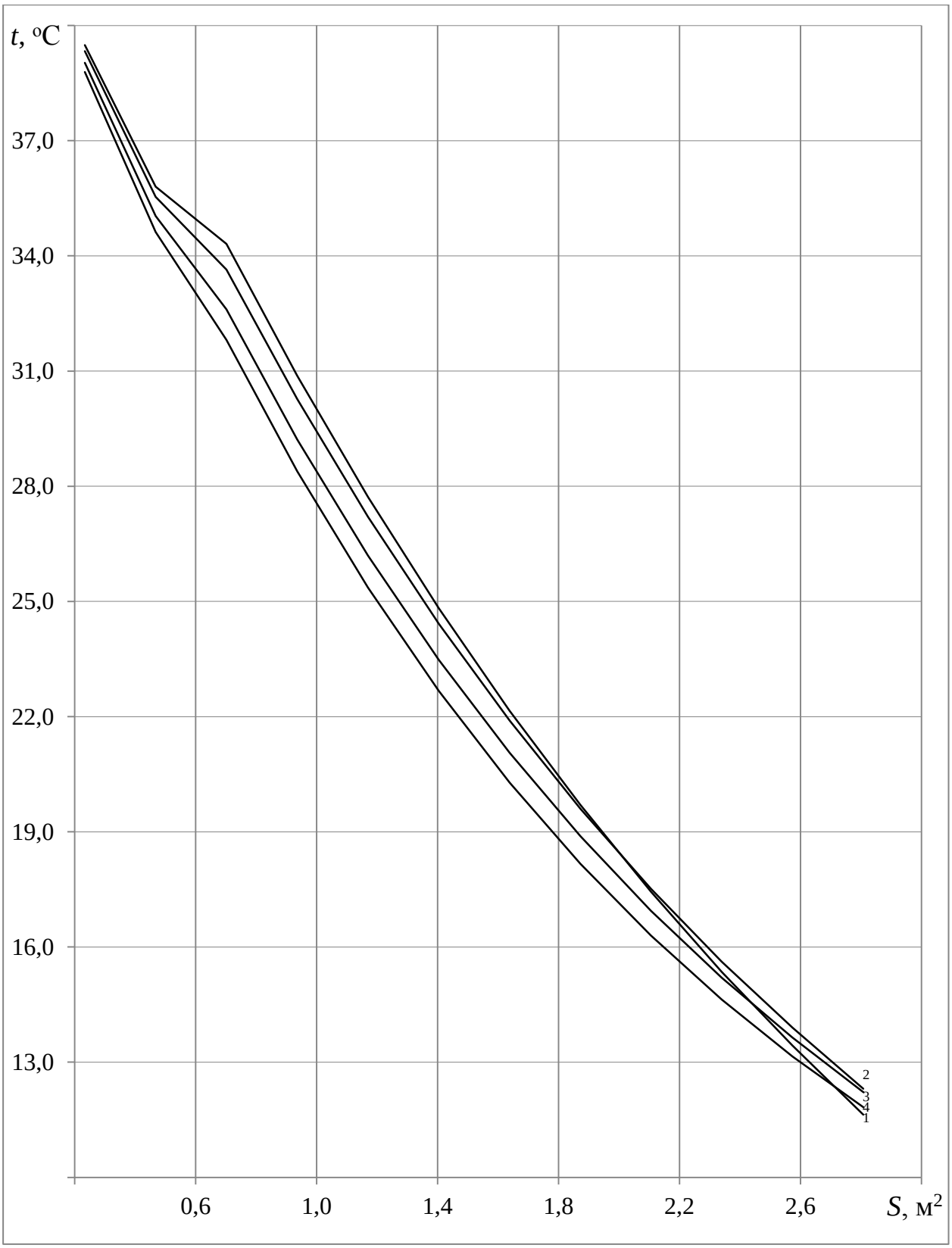


Рис. 5.5. Номограмма для определения площади теплопередачи скребкового теплообменника при массовой доле сухих веществ 55 % в молочной сыворотке, начальной температуре 42,5 °С, и кратности хладоносителя: ***2*** - кривые 1; ***2,5*** - 2; ***3*** - 3; ***4*** - 4

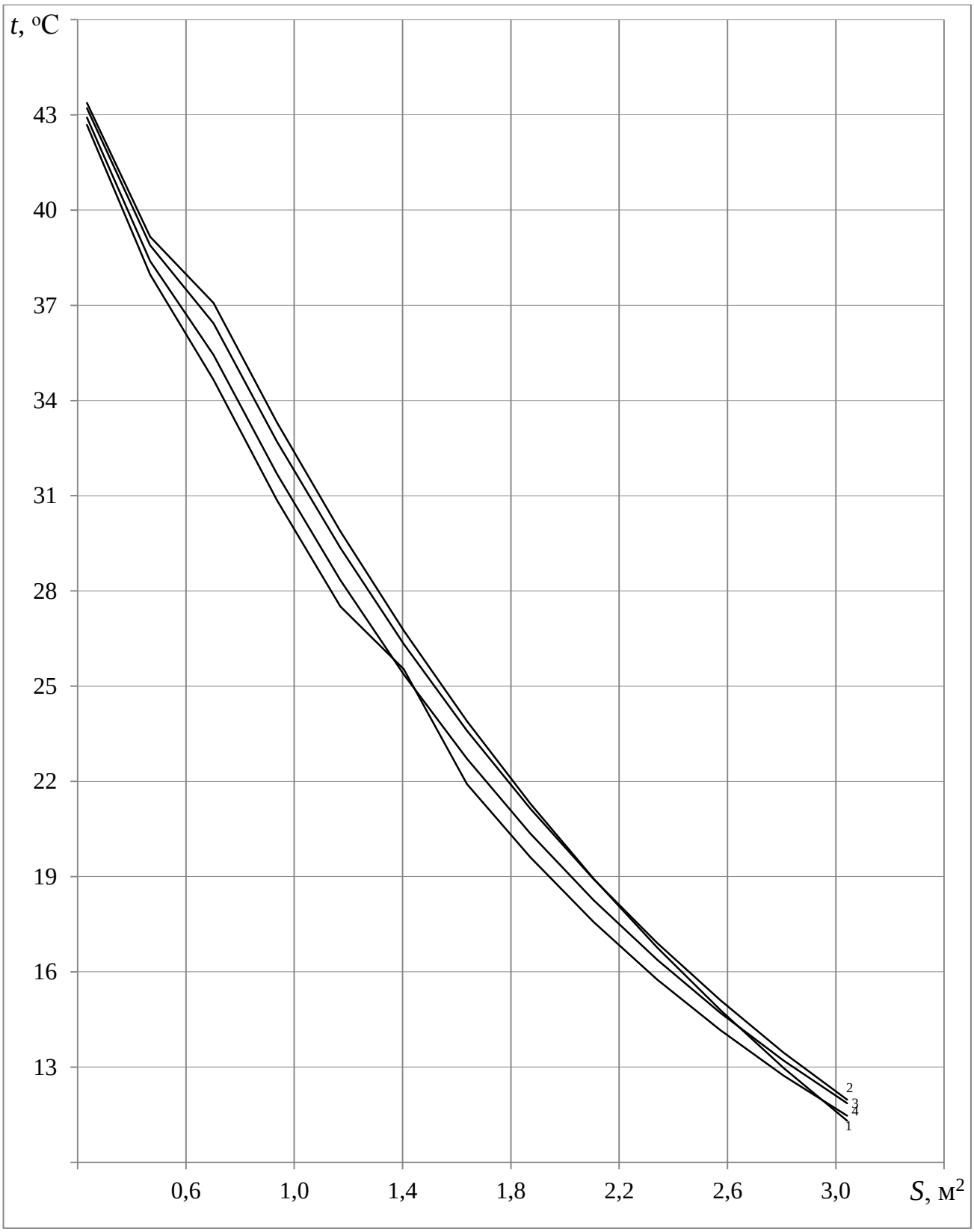


Рис. 5.6. Номограмма для определения площади теплопередачи скребкового теплообменника при массовой доле сухих веществ 60 % в молочной сыворотке, начальной температуре 42,5 °С, и кратности хладоносителя: ***2*** - кривые 1; ***2,5*** - 2; ***3*** - 3; ***4*** - 4

Номограммы разработаны для определения площади теплопередачи пластинчатого скребкового теплообменника непрерывного действия при кристаллизации лактозы молочной сыворотки с массовой долей сухих веществ 50-60 %, начальной температуры 50-60 ^{o}C, кратности хладоносителя 2-4.

Выбор параметров и их диапазон при разработке номограмм был определён с учётом свойств сгущенной молочной сыворотки, реальных условий производства и режимных параметров процесса кристаллизации лактозы.

Направление движения хладоносителя имеет важное значение при охлаждении сгущённой молочной сыворотки в потоке. Выбор направления движения хладоносителя был проведён на основе анализа и сопоставления результатов исследования теплообмена при прямоточной и противоточной схемах движения хладоносителя. Определено, что противоток позволяет получить более эффективные результаты теплообмена. Поэтому номограммы, разработанные для определения площади теплопередачи пластинчатых скребковых теплообменников непрерывного действия при кристаллизации лактозы молочной сыворотки, приведены для противоточной схеме организации процесса.

Особенность номограмм для определения площади теплопередачи первой и второй секций аппарата заключается в следующем. При разработке номограмм для первой секции температура сгущённой молочной сыворотки на выходе из первой секции соответствует температуре массовой кристаллизации лактозы. Температура массовой кристаллизации лактозы была определена экспериментально и подтверждена производственными испытаниями.

При построении номограмм для второй секции температура сгущённой молочной сыворотки соответствует температуре сгущённой молочной сыворотки на выходе из первой секции

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе комплексного подхода к физико-химическим явлениям в тепломассобменных процессах дано развитие физической модели изменения температуры сгущённой молочной сыворотки при кристаллизации в ней лактозы в потоке с учётом вязкостных свойств сыворотки;

2. На основе физической модели разработана математическая модель переноса теплоты в потоке при осесимметричном распределении температуры в сыворотке без учета диссипации энергии для кристаллизации в ней лактозы, и получены выражения для определения изменения температуры сгущенной молочной сыворотки и влияния радиальной скорости, как при центральном способе её подачи, так и при периферийном способе подачи в продуктовую зону аппарата при кристаллизации лактозы;

3. Экспериментально исследованы закономерности изменения температуры массовой кристаллизации лактозы и определено количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние;

4. Установлено влияние частоты вращения рабочих органов РПА на количество образующихся кристаллов лактозы и их средний размер;

5. Получены экспериментальные данные о влиянии температуры нагревания на средний размер кристаллов лактозы;

6. Разработана инженерная методика расчёта скребкового теплообменника непрерывного действия при кристаллизации лактозы сыворотки на основе кинетики её температурных изменений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер и др. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

2. Андрианов, ЮП. Производство сливочного масла/ Ю.П. Андрианов, Ф.А. Вышемирский, Д.В. Качераускис и др.,; под ред. Ф.А. Вышемирского. – М.: Агропромиздат, 1988. – 268 с.

3. Антипов, С.Т. Машины и аппараты пищевых производств. В 2-х кн. / С.Т. Антипов, И.Т Кретов, А.Н. Остриков, В.А. Панфилов, О.А. Ураков. – М.: Высш. шк. , 2001. — 1379 с.

4. Бакли, Г. Рост кристаллов / Г. Бакли – М.: Иностранная литература, 1954. – 406 с.

5. Баранов, Г.П. Кристаллизация в циркулирующей суспензии: автореф. дис. канд. техн. наук / Баранов Геннадий Петрович. – Б.М., 1967. – 18 с.

6. Белозерова, Д.А. Влияние циклической температурной обработки кристаллизата на скорость роста кристаллов лактозы / Д.А. Белозерова, В.Г. Куленко, В.Б. Шевчук, Е.А. Качалова, Е.А. Фиалкова // Молочнохозяйственный Вестник. – 2012. – №2. – С. 69-75.

7. Блох, Л.С. Практическая номография / Л.С. Блох. – М.: Высшая школа, 1971. – 328 с.

8. Брагинский, Л.Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета Текст. / Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш. Л.: Химия, 1984. - 336с.

9. Бредихин А.С. Гидродинамика процесса охлаждения молочной сыворотки при поточной кристаллизации лактозы /А.С. Бредихин, В.В. Червецов// Вестник ВГУИТ. – 2013. – №3(57). – Воронеж. – С. 36-40.

10. Бредихин А.С. Закономерности охлаждения молочной сыворотки при поточной кристаллизации лактозы /А.С. Бредихин, В.В. Червецов//Известия Вузов. Пищевая Технология. – № 5-6. – 2013. – Краснодар. – С. 78-82.

11. Бредихин А.С. Особенности охлаждения молочной сыворотки при поточной кристаллизации лактозы /А.С. Бредихин, В.В. Червецов//Техника и технология пищевых производств. –№4(31). – 2013. – Кемерово. – С.113-117.

12. Бредихин А.С. Теплообмен при охлаждении молочной сыворотки в потоке /А.С. Бредихин, В.В. Червецов //Вестник ВГУИТ. – 2013.– №2(56). – Воронеж. – С. 58-62.

13. Бредихин, А.С. Исследования течения молочной сыворотки в теплообменнике непрерывного действия / А.С. Бредихин, В.В. Червецов // Известия ТСХА. – 2013. – № 5. – С. 164-170.

14. Бредихин, С.А. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебное пособие / С.А. Бредихин, А.С. Бредихин, А.Г Жуков, Ю.В. Космодемьянский, А.О. Якушев; под ред. С.А. Бредихина. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 544 с.

15. Бредихин, С.А. Технологическое оборудование предприятий молочной промышленности. – М.: Колос, 2010. – 408 с.

16. Бредихин, С.А. Технология и техника переработки молока / С.А. Бредихин, Ю.В. Космодемьянский, В.Н. Юрин. – М.: Колос, 2001. – 400 с.

17. Васильцов, Э.А. Аппараты для перемешивания жидких сред / Э.А. Васильцов, В.Г. Ушаков. – Л.: Машиностроение, 1979. - 271 с.

18. Волкова, Т.А. Кристаллизация лактозы: Обзорная информация / Т.А. Волкова, Э.Ф. Кравченко, Х.Ю. Терлоев. – М.: АгроНИИТЭИММП, 1994. – 28 с.

19. Вульф, Ю.В. Избранные работы по кристаллофизике и кристаллографии / Ю.В. Вульф. – М.-Л: Технико-теоритическая литература, 1952. – 343 с.

20. Гиббс, ДЖ.В. Термодинамические работы / ДЖ.В. Гиббс. – М.-Л: Гостехориздат, 1950. – 492 с.

21. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – С. 288.

22. Гнездилова, А.И. Физико-химические основы мелассообразования и кристаллизации лактозы и сахарозы в водных растворах: Монография / Гнездилова А.И., Перелыгин В.М. – Воронеж: Издательство ВГУ, 2002. – 96 с.

23. Гнездилова, А.И. Влияние примесей на кристаллизацию лактозы и сахарозы в пересыщенных водных растворах / А.И. Гнездилова. – Изв. Вузов. Пищевая технология. – 2001. – № 5-6. – С. 57-59.

24. Гнездилова, А.И. Процессы и аппараты пищевых производств / А.И. Гнездилова. – Вологда – Молочное: ВГМХА, 2006. – 71 с.

25. Гнездилова, А.И. Развитие научных основ кристаллизации лактозы и сахарозы в многокомпонентных водных растворах / Автореферат дисс. д.т.н наук.. – М., 2000. - 46 с.

26. Гнездилова, А.И. Развитие научных основ кристаллизации лактозы и сахарозы в многокомпонентных водных растворах. Дис. д.т.н. – Вологда, 2000. - 490 с.

27. Гнездилова, А.И. Физико-химические и теплофизические свойства основных видов пищевых продуктов: учебное пособие с грифом УМО / А.И. Гнездилова, Н.Н. Липатов, В.С. Кузнецова, В.Г. Куленко. – Вологда – Молочное: ИЦ ВГМХА, 2007. – 101 с.

28. Гнездилова, А.И. Физико-химические основы мелассообразования и кристаллизации лактозы и сахарозы в водных растворах / А.И. Гнездилова А, В.М. Перелыгин. – Воронеж: Изд. ВГУ, 2002. – 91 с.

29. Голубева, Л.В. Хранимоспособность молочных консервов / Л.В. Голубева, Л.В. Чекулаева, К.К. Полянский. – М.: ДеЛипринт, 2001. - 115 с.

30. Горбатов, А. В. Реология мясных и молочных продуктов Текст. / А. В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.

31. Горбатов, А. В. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов Текст. / А. В. Горбатов, А. М. Маслов, Ю. А. Мачихин. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 296 с.

32. ГОСТ 21-94. Сахар-песок. Технические условия.

33. Гулый, И.С. Физико- химические процессы сахарного производства / И.С. Гулый, В.М. Лысянский, Л.П. Рева и др. – М.: Агропромиздат, 1987. – 264 с.

34. Евдокимов, И.А. Современное состояние и перспективы переработки молочной сыворотки/ И.А. Евдокимов // Молочная промышленность: науч.-техн. производственный журнал. – 2006. – №2. - С. 34-36.

35. Зайковский, Я.С. Разложение, растворимость и кристаллизация молочного сахара / Я.С. Зайковский // Тр. Омск: СХИ. – 1940. – т. 19. –

36. Калошин, Ю.А. Технологическое оборудование. Учебно-практическое пособие / Ю.А. Калошин, О.В. Травин, А.Н. Мамцев. – М.: МГУТУ, 2004. – 80 С.

37. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – 9-е. изд. – М.: Химия, 1973. – 752 с.

Кн. 1: Учеб.для вузов Текст. / С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. Н. Остриков и др.; Под ред. акад. РАСХН В. А. Панфилова. – М.: Высш. шк., 2001. – 703 с.

38. Консервы молочные и продукты молочные сухие. Методы анализа. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

39. Косой, В.Д. / Реология молочных продуктов: учебник / В.Д. Косой, Н.И. Дунченко, М.Ю. Меркулов. – М.:ДеЛипринт, 2010. – 826 с.

40. Кук, Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности / Г.А. Кук. – М.: Пищ. Пром-сть, 1973. – 768 с.

41. Кулаков, А.В. Элементы механики пищевых сред / А.В. Кулаков, В.М. Чесноков. – М.: МГУПБ, 2004. – 301 с.

42. Кутателадзе, С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 367 с.

43. Кэйс, В.М. Конвективный тепло и массообмен / В.М. Кэйс. – М.: Энергия, 1972. – 445 с.

44. Маслов, А.М. Инженерная реология в пищевой промышленности / А.М. Маслов. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1977. – 88 с.

45. Маслов, А. М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей Текст. / А. М. Маслов. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 208 с.

46. Матусевич Л.Н. Общие закономерности массовой кристаллизации из растворов и разработка новых конструкций кристаллизаторов / Автореф. дис. д.т.н. – Свердловск, 1968. – С. 23.

47. Мачихин, С.А. Машины и оборудование пищевой и перерабатывающей промышленности / С.А. Мачихин, В.Б. Акопян, С.Т. Антипов и др.; под ред. С.А. Мачихина. – М.: Машиностроение, 2003. – 736 с.

48. Мачихин, Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.

49. Мачихин, Ю.А. Реология пищевых продуктов / Ю.А. Мачихин, Ю.К. Берман. Часть 1. – М.: МГУПП, 1999. – 84 с.

50. Медведев, Г.В. Влияние затравки и пересыщения раствора на размер и однородность полученных кристаллов/ Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Свердловск, 1972. – С.

51. Мейер, К. Физико-химическая кристаллография / Мейер К. – пер. с нем. О.П. Никитиной. – М.:Металлургия. 1972. – 480 с.

52. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: «Энергия», 1977. – 342 с.

53. Нестеренко, П.Г. Производство сгущённых концентратов на основе молочной сыворотки / П.Г. Нестеренко //Известия вузов. Пищевая технология. – 1992. - № 2. – С. 5-10.

54. Павлов, В.А. Новые методы переработки молочной сыворотки. / В.А Павлов. – М.: Росагропромиздат, 1990. – 150 с.

55. Павлов, В.А. Применение методов обратного осмоса и электродиализа при получении молочного сахара из сыворотки хлоркальциевого осаждения / В.А. Павлов, Б.Е. Миль, Г.А. Бедных, Г.С. Зародин. Обзорная информация. ЦНИИТЭИМясомолпром, 1981. – 35 с.

56. Панфилов, В.А., Теоритические основы пищевых технологий: В 2-х книгах / В.А. Панфилов. – Книга 2. –М.: КолосС, 2009. – 800 с.

57. Полянский, К.К. Кристаллизация лактозы в производстве молочных продуктов. Дис. д.т.н. – М., 1981. – 284 с.

58. Полянский, К.К. Кристаллизация лактозы: физико-химические основы / К.К. Полянский, А.Г. Шестов. – Воронеж: Изд. ВГУ, 1995. – 184 с.

59. Полянский, К.К., Шестов А.Г. Физико-химические процессы при производстве молочного сахара / К.К. Полянский, А.Г. Шестов//Молочная промышленность, 1978. - № 6. – С. 16-20.

60. Радаева, И.А. Повышение качества молочных консервов / И.А. Радаева. – М: Пищпром., 1980. – 160с.

61. Рашкин, К.А. Аналитическое исследование теплопередачи в пластинчатом скребковом аппарате / К.А. Рашкин, В.М. Чесноков, С.А. Бредихин // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2013. – №5. – С. 15-18.

62. Рашкин, К.А. Закономерности термообработки вязких продуктов в пластинчатом теплообменном аппарате / К.А. Рашкин, В.М. Чесноков, С.А. Бредихин // Вестник Воронежского государственного университета инженерной технологии. – 2012. – №2. – С. 52-57.

63. Рогинский С.З. Кинетика роста кристаллов / С.З. Рогинский // Журнал физической химии, 1939. – Т. XIII. вып. 8. – С. 1040-1052.

64. Рогинский, С.З. Кинетика роста кристаллов /С.З. Рогинский // Журнал физической химии, 1939. – Т. XIIIвып. 8. – С. 1040-1052.

С. 73 – 105.

65. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский.и др. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 320 с.

66. Серов, А.В. Химия и физика лактозы и её производных. Монография / А.В. Серов. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2003. – 116 с.

67. Силин П.М. Технология сахара / П.М. Силин. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 624 с.

68. Синельников, Б.М. Лактозы и ее производные /Б.М. Синельников и др. – СПб: Профессия, 2007. – 768 с.

69. Странский, И.Н. К теории роста кристаллов и образование кристаллических зародышей / И.Н. Странский, Р.К. Каишев // Успехи хим., 1939. – Т. 21, вып. 4. – С. 408-465 с.

70. Стрикленд-Констэбл, Р.Ф. Кинетика и механизм кристаллизации / Р.Ф. Стрикленд-Констэбл. – Л.: Недра, 1971. – 310 с.

71. Тарг, С.М. Основные задачи теории ламинарных течений / С.М. Тарг. – М–Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. – 420 с.

72. Твердохдеб, А. В. Новое оборудование для производства маргарина Текст. / А. В. Твердохлеб // Масложировая промышленность. 2003. — № 3. - С. 90-91.

73. Твердохлеб, А. В. Универсальные маслообразователи и скребковые пастеризаторы Текст. / А. В. Твердохлеб, Е. М. Тихонова // Молочная промышленность. 2004. - № 5. - С. 55.

74. Твердохлеб, Г.В. Температурные режимы при выработке масла поточным методом/ Г.В. Твердохлеб //Изв. вузов СССР. Пищевая технология- 1965.- № 5 - С.84-90.

75. Топал, О.И. Растворимость и кристаллизация лактозы в многокомпонентных системах молочного производства / Автореферат дис. канд. техн. наук. – Вологда, 1999. – 20 с.

76. Фетисов, Е.А. Статистические методы контроля качества молочной продукции: справочное руководство / Е.А. Фетисов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 80 с.

77. Фиалков, А.Н. Математическое описание процессов кристаллизации лактозы в водных растворах / А.Н. Фиалков, И.К. Голубенцева // Труды Вологодского молочного ин-та. – 1972. – Вып. 64. – С. 124-134.

78. Фиалкова, Е.А. Обобщенная диффузионная теория кристаллизации лактозы из пересыщенных растворов / Е.А. Фиалкова, И.А. Евдокимов, В.Г. Куленко, Е.А. Качалова, Е.М. Костюков // Фундаментальные исследования. – 2006. - №7. – С. 23-24.

79. Фиалкова, Е.А. Теория роста кристаллов лактозы в зависимости от их размеров / Е.А. Фиалкова, И.А. Евдокимов, В.Г. Куленко, Е.А. Качалова, Е.М. Костюков // Сб. материалов международного научно-технического семинара «Современные направления переработки сыворотки», Ставрополь: НОУ

«Образовательный научно-технический центр молочной промышленности». – 2006. – С. 57-58.

80. Фисенко, Д.М. Совершенствование процесса кристаллизации лактозы / Д.М. Фисенко, И.А. Евдокимов, А.Д. Лодыгин // Молочная промышленность. – 2009. - №9. – С. 67-67.

81. Фольмер, М. Кинетика образования новой фазы / М. Фольмер. – М.: Наука, 1986. – 208 с.

82. Хамский, Е.В. Кристаллизация из растворов / Е.В. Хамский. – Л.: Наука, 1967. – 150 с.

83. Харин, В.М. Исследование кинетики массовой кристаллизации из растворов:/ Автореферат дис. докт. техн. наук. – Воронеж, 1979. – 28 с.

84. Ходос, А.И. Опыт переработки подсырной сыворотки / А.И. Ходос // Молочная промышленность: науч.-техн. производств.журнал. – 2008. – №2. – С. 33-35.

85. Храмцов, А.Г. Молочный сахар / А.Г. Храмцов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.

86. Храмцов, А.Г. Переработка и использование молочной сыворотки: Технологическая тетрадь / А.Г. Храмцов, В.А. Павлов, П.Г. Нестеренко и др. – М.: Росагропромиздат, 1989. – 271 с.

87. Храмцов, А.Г. Производство молочного сахара / А.Г. Храмцов, Э.Ф. Кравченко. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 96 с.

88. Храмцов, А.Г. Технология продуктов из молочной сыворотки: учебное пособие / А.Г. Храмцов, П.Г. Нестеренко. – М.: ДеЛипринт, 2003. – 768 с.

89. Чеботарев, Е.А. Вязкость молочной сыворотки и продуктов из нее / Е.А. Чеботарёв, П.Г. Нестеренко, Л.Е. Давыдянц, Н.И. Михайлов, Н.Г. Чеботарёва // Молочная промышленность. – 1983. № 2. – С. 26-27.

90. Шевчук, В.Б. Параметры температуры внесения затравки при кристаллизации лактозы в сгущённых молочных консервах с сахаром / В.Б. Шечук, А.И. Гнездилова //Известия ВУЗов. – 2005. - № 1. – С. 68-70.

91. Шестов, А.Г. Муторация, растворение и кристаллизация лактозы / А.Г. Шестов, К.К. Полянский //Изв. Вузов. Пищевая технология. – 1978. - №3 – С. 48-56.

92. Broun D.J. Crystal grouth measurement and modeling of fluid flow in a crystallizer / D.J. Broun , F. Bousan //Zuckerindustrie. – 1992. – V.117. - № 1. P. – 35-39.

93. GerritSmit. Dairy Processing: Improving Quality. - Woodhead Publishing, 2003. – 546 p.

94. Gustavo V. Barbosa - Cánovas, Anthony J. Fontana, Jr., Shelly J. Schmidt, Theodore P. Labuza. Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications. - John Wiley & Sons, 2008 - 440 p.

95. José Miguel Aguilera, Ricardo Simpson, Jorge Welti-Chanes. Food Engineering Interfaces. - Springer, 2010 - 712 p.

96. Laura Elmira Krusch. The Kinetics of Lactose Crystallization in a Pure Powder System and in Whole Milk Powder. - Univeersity of Minnesota, 2003 - 450 p.

97. Marianne Kaaber Thomsen. Lactose Crystallization, Maillard Reactions and Lipid Oxidation in Milk Powder: PhD Thesis. - Food Chemistry, Department og Food Science, Royal Veterinary and Agricultural University, 2005.

98. Mennicke V. Zweieinface Varfahrenrurgenagen Bestommung der Dichte von festen Butterfett/Zeitschrift fur Lebensmittel – Undersuchung und Forchung //1972, № 4, p. 232 – 240.

99. Michael Eskin, David S. Robinson. Food Shelf Life Stability: Chemical, Biochemical, and Microbiological Changes. - CRC Press, 2010. - 384 p.

100. P. Walstra, Pieter Walstra, Jan T. M. Wouters, Tom J. Geurts. Dairy Science and Technology, Second Edition. - CRC Press, 2010 – 808 p.

101. P. Walstra. Dairy Technology: Principles of Milk Properties and Processes. - CRC Press, 1999. - 752 p.

102. Patrick F. Fox, Paul L. H. McSweeney. Dairy Chemistry and Biochemistry. – N.Y., 1998. – 479 p.

103. Popov M. Incercaripemodelecupul very rarea Gluidelarstudiv so ceretari de mecan icaaplicata Academia Repiblici Populare Romane. 1956V. 7, № 1.

104. Ramesh C. Chandan, ArunKilara, Nagendra Shah. Dairy Processing and Quality Assurance. - John Wiley & Sons, 2009. - 600 p.

105. Rha C. Thermal properties of Food Materials –Series in Food Materials; Boston, 1974 № 1, p. 414.

106. Shin Yee Wong. A Systematic Approach to Optimization of Industrial Lactose Crystallization. - University of Wisconsin--Madison, 2011 - 198 p.

107. Spreer E. Technologie der Milchverarbeitung. – Hamburg: Behr's Verlag, 1995. – 517 s.

108. Tresch, ChemieEng. Technic, 1954, 24, №6

109. Walstra, P. and Jennes, R. Dairy Chemistry and Physics; John Wiley & Sons, Inc. New York – 1984.

110. Walstra, P. Chem. Eng. Sci. 29 – 1974. –S. 882

111. Walstra, P. Neth. Milk Dairy J. 23. – 1969. – S. 290.

112. Watson P.D. The Density of Milh at low temperatures/Tettsler R.P. //Journal by Dairy Science, 1961. v. 44, № 3. -p. 416 – 418

113. Weis M. Atomization in high Velocoty airstreams //Worsham American Rocket Saciety Journal, v. 16, № 1-2, 1961.

114. ZekiBerk. Food Process Engineering and Technology. - Academic Press, 2013. - 720 p.

115. http://books.google.ru – «База книг на всех языках мира».

116. http://chemistry-chemists.com/Uchebniki/Chemistry-books-Spravochniki.html - «Справочники по химии и химической технологии».

117. http://cyberleninka.ru – «Научная электронная библиотека».

118. http://dic.academic.ru – «Словари и энциклопедии».

119. http://elibrary.ru - «Научная электронная библиотека».

120. http://knowledge.allbest.ru – «База знаний. Электр.библиотека».

121. http://lactose.ru/ru - «Лактоза и ее производные».

122. http://molmash.ru – «Сайт ФГУП ЭЗ "МОЛМАШ»

123. http://molokoportal.ru – «Молочный портал».
124. http://n-t.ru – «Наука и техника – электронная библиотека».
125. http://prodobavki.com – «Пищевые добавки».
126. http://ru.wikipedia.org – «Википедия – свободная энциклопедия».
127. http://rudocs.exdat.com – «Документы учебного характера».
128. http://slovari.yandex.ru – «Словари».
129. http://www.chemport.ru – «Химический портал».
130. http://www.dairyunion.ru - «Молочный Союз России»
131. http://www.gks.ru – «Федеральная служба гос. статистики».
132. http://www.mcd-chemicals.ru – «Промышленные пищевые добавки».
133. http://www.monographies.ru - «Научная электронная библиотека».
134. http://www.statsoft.ru - «Планирование эксперимента».
135. http://www.vsegost.com – «Библиотека ГОСТов».
136. http://www.xumuk.ru – «Сайт о химии».
137. http://ya.ru – «Поисковая система».
138. https://www.google.ru - «Поисковая система».

Приложение 1

БЛАГОДАРНОСТЬ

НАГРАЖДАЕТСЯ

А.С. Бредихин

за участие
в X МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СТУДЕНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«ЖИВЫЕ СИСТЕМЫ И
БИОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
НАСЕЛЕНИЯ»

Москва ФГБОУ ВПО МГУПП
ноябрь 2012

Проректор по научной работе
д.х.н., проф. Ю.В. Бабин

НАУЧНЫЙ ВКЛАД МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ В РАЗВИТИЕ ПИЩЕВОЙ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ АПК

VII НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ ОТДЕЛЕНИЯ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ РОССЕЛЬХОЗАКАДЕМИИ

СЕРТИФИКАТ

Бредихин Алексей Сергеевич

ТЕМА РАБОТЫ:
«ОСОБЕННОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ СГУЩЕННОЙ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ В ПОТОКЕ»

Вице-президент, академик Россельхозакадемии Лисицын А.Б.

Приложение 2

СПИСОК ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ БРЕДИХИНА А.С.

Учебное пособие

1.Бредихин, С.А. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебное пособие /С.А. Бредихин, **А.С. Бредихин**, В.Г. Жуков, Ю.В. Космодемьянский, А.О. Якушев. – СПб.: Издательство Лань, 2014. – 544 с.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2.**Бредихин, А.С**. Теплообмен при охлаждении молочной сыворотки в потоке [Текст] /А.С. Бредихин, В.В. Червецов // Вестник ВГУИТ. – 2013.– №2(56). – Воронеж. – С. 58-62.

3.**Бредихин, А.С**. Гидродинамика процесса охлаждения молочной сыворотки при поточной кристаллизации лактозы [Текст] / А.С. Бредихин, В.В. Червецов// Вестник ВГУИТ. – 2013. – №3(57). – Воронеж. – С. 36-40.

4.**Бредихин, А.С**. Аналитические исследования охлаждения молочной сыворотки в потоке [Текст] / А.С. Бредихин, С.А. Бредихин, В.В. Червецов // Известия ТСХА. – № 4. – 2013. – Москва. – С.119-127.

5.**Бредихин, А.С**. Особенности охлаждения молочной сыворотки при поточной кристаллизации лактозы [Текст] / А.С. Бредихин, В.В. Червецов // Техника и технология пищевых производств. –№4(31). – 2013. – Кемерово. – С.113-117.

6.**Бредихин, А.С**. Гидродинамика процесса охлаждения жидких пищевых сред в потоке [Текст] / А.С. Бредихин, В.В. Червецов, С.А. Бредихин, К.А. Рашкин // Хранение и переработка сельхозсырья. – №11. – 2013. – Москва. – С. 5-7.

7.**Бредихин, А.С**. Исследования течения молочной сыворотки в теплообменнике непрерывного действия [Текст] / А.С. Бредихин, В.В. Червецов // Известия ТСХА. – № 5. – 2013. – Москва. – С. 164-170.

8.**Бредихин, А.С**. Закономерности охлаждения молочной сыворотки при поточной кристаллизации лактозы [Текст] / А.С. Бредихин, В.В.

Червецов//Известия Вузов. Пищевая Технология. – № 5-6. – 2013. – Краснодар. – С. 78-82.

Статьи и материалы конференций

9.**Бредихин, А.С**. Современное оборудование кристаллизации лактозы [Текст] / А.С. Бредихин, В.В. Кирсанов, А.Е. Кузнецова, М.Н. Гощанская, В.В. Червецов // Материалы X международной конференции «Живые системы и биологическая безопасность населения». – Москва. – 2012. – С. 213-218.

10.**Бредихин, А.С**. Современные аппараты кристаллизации лактозы [Текст] / А.С. Бредихин, В.В. Кирсанов, А.Е. Кузнецова, М.Н. Гощанская, В.В. Червецов.// Материалы Международной научно-технической Конференции «Адаптация ведущих технологических процессов к пищевым машинным технологиям». – Воронеж. –ФГБОУ ВПО ВГУИТ. – 2012. – С. 115-118.

11.**Бредихин, А.С**. Современные способы и оборудование кристаллизации лактозы [Текст] /А.С. Бредихин, В.В. Кирсанов, А.Е. Кузнецова, М.Н. Гощанская, В.В. Червецов // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Технология и продукты здорового питания». – Саратов: Издательство «КуБиК». – 2012. – С. 36-39.

12.**Бредихин, А.С**. Современные способы кристаллизации лактозы [Текст] / А.С. Бредихин, В.В. Кирсанов, А.Е. Кузнецова, М.Н. Гощанская, В.В. Червецов // Материалы международной научно-технической конференции «Производство продуктов для здоровья человека – как составная часть наук о жизни». – Воронеж. - ФГБОУ ВПО ВГУИТ. – 2012. – С. 213-218.

13.**Бредихин, А.С**. Современное оборудование кристаллизации лактозы [Текст] / А.С. Бредихин, В.В. Кирсанов, А.Е. Кузнецова, М.Н. Гощанская, В.В. Червецов // Материалы X Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Живые системы и биологическая безопасность населения». – Москва. – ФГБОУ ВПО МГУПП. – 2012. – С. 260-264.

14.**Бредихин, А.С**. Инновационные способы кристаллизации лактозы в лактозосодержащих продуктах [Текст] /А.С. Бредихин, В.В. Кирсанов, А.Е.

Кузнецова, М.Н. Гощанская, В.В. Червецов // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии и оборудование – основа успеха работы молочной промышленности в условиях ВТО». – Адлер. – Ассоциация предприятий молочной промышленности «КУБАНЬМОЛОКО».– 2012.- С.98-102.

15.**Бредихин, А.С**. Молочная сыворотка как объект кристаллизации лактозы [Текст] / А.С. Бредихин, С.А. Бредихин, В.В. Червецов //Всероссийская юбилейная научная конференция, посвященная 125-летию со дня рождения академика Н.И. Вавилова «Научное наследие Н.И. Вавилова и современность». – Москва. – РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. – 2013. – С. 147-150.

16. Кузнецова, А.Е. Lactose crystallization: current issues and promising engineering solutions. Актуальные вопросы процесса кристаллизации молочной лактозы. Перспективные аппаратурно-технологические решения [Текст] /А.Е. Кузнецова, В.В. Кирсанов,М.Н. Стрижко, **А.С. Бредихин**, В.К. Семипятный, В.В. Червецов, А.Г. Галстян // Международный научный журнал «Foods and Raw materials». –№ 1. – 2013. – С. 66-74.

Приложение 3

В диссертационный совет

АКТ
об использовании (внедрении) научно-исследовательской работы в учебном процессе

Настоящим сообщаю, что материалы диссертационной работы аспиранта ГНУ ВНИМИ Бредихина Алексея Сергеевича на тему «Разработка и совершенствование поточного способа кристаллизации лактозы молочной сыворотки» используется в учебном процессе студентами, обучающимися по специальности 260601.65 «Машины и аппараты пищевых производств» и по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование» 151000.62 (бакалавриат) и 151000.68 (магистратура).

Теоретические разработки и результаты экспериментальных исследований применяются при выполнении курсовых работ и проектов, рефератов по дисциплинам «Процессы и аппараты пищевых производств», «Технологическое оборудование предприятий молочной промышленности» и «Технологическое оборудование отрасли».

Заведующий кафедрой
«Технологическое оборудование
пищевых предприятий», д.т.н., проф.,
академик РАСХН Панфилов В.А.

«14» июня 2013 г.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВПО МГУПП
д.в.н., профессор
Кальницкая О.И.
«25» 06 2013 г.

АКТ
об использовании (внедрении) научно-исследовательской работы в учебном процессе

Мы, комиссия в составе проректора по учебной работе ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет пищевых производств» д.в.н., профессора Кальницкой Оксаны Ивановны и заведующего кафедрой д.т.н., профессора, академика РАСХН Панфилова Виктора Александровича составили настоящий акт о том, что материалы диссертационной работы аспиранта ГНУ ВНИМИ Бредихина Алексея Сергеевича на тему «Разработка и исследование поточного способа кристаллизации лактозы молочной сыворотки» используется в учебном процессе студентами, обучающимися по специальности 260601.65 «Машины и аппараты пищевых производств» и по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование» 151000.62 (бакалавриат) и 151000.68 (магистратура).

Теоретические разработки и результаты экспериментальных исследований применяются при выполнении курсовых работ и проектов, рефератов по дисциплинам «Процессы и аппараты пищевых производств», «Технологическое оборудование предприятий молочной промышленности» и «Технологическое оборудование отрасли».

Заведующий кафедрой
«Технологическое оборудование
пищевых предприятий», д.т.н., проф.,
академик РАСХН _____ Панфилов В.А.

Приложение 4

ОАО «УОМЗ «ВГМХА»
160555, г. Вологда, с. Молочное,
ул. Панкратова,д.15
тел/факс-(8172)-525-078,525-602
E-mail: uomz@vologda.ru

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
ОАО УОМЗ ВГМХА
им. Н.В. Верещагина
_____Черник В.П.
«10» 12 2013г.

АКТ
опытно-промышленной проверки поточного способа кристаллизации лактозы в сгущенной подсырной молочной сыворотке.

Комиссия в составе: председателя – главного инженера ОАО УОМЗ ВГМХА им. Н.В. Верещагина Черника В.П.; главного механика ОАО УОМЗ ВГМХА им. Н.В. Верещагина Фомичева А.А.; начальника производства ОАО УОМЗ ВГМХА им. Н.В. Верещагина, к.т.н. Кузнецовой Ж.Ю., зав. кафедрой технологического оборудования ВГМХА им. Н.В. Верещагина, к.т.н. Куленко В.Г., профессора кафедры технологического оборудования ВГМХА им. Н.В. Верещагина, д.т.н. Гнездиловой А.И., зав. лабораторией молочных консервов ФГБНУ ВНИМИ, д.т.н. Червецова В.В., аспиранта ФГБНУ ВНИМИ Бредихина А.С. составила настоящий акт о том, что в период с 02.09.2013 по 16.09.2013 и с 09.12.2013 по 20.12.2013 на ОАО «Учебно-опытный молочный завод» ВГМХА им. Н.В. Верещагина» была проведена опытно-промышленная проверка поточного способа кристаллизации лактозы в сгущенной подсырной молочной сыворотке на базе трехсекционного пластинчатого скребкового теплообменника.

Исследованиями предусматривалось два варианта кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке: 1. охлаждение до t= 37-38°С с последующей подачей на сушку в потоке; 2. охлаждение сыворотки до 12-15°С, с внесение (без внесения) затравки при температуре массовой кристаллизации лактозы с последующим нагревом до t=45 - 55°С. Далее сгущенная молочная сыворотка может подаваться на сушку.

Сгущенную молочную подсырную сыворотку с начальной температурой 60-65°С и содержанием сухих веществ 50-60 % подавали насосом объемного действия в первую секцию пластинчатого скребкового теплообменника, где охлаждалась до температуры массовой кристаллизации лактозы, и далее поступала в роторно-пульсационный аппарат (далее РПА). Перед подачей в РПА в охлажденную сгущенную молочную подсырную сыворотку насосом-дозатором через струйный смеситель впрыскивалась затравка, в качестве которой использовалась взвесь пудры лактозы в растительном жире в соотношении 1 к 5. В РПА сыворотка подвергалась интенсивному гидродинамическому воздействию, что обеспечивало гарантированно-равномерное распределение затравки по всему объему обрабатываемого продукта. После РПА сыворотка поступала во вторую секцию охлаждения, где охлаждалась до t=12-15 °С и затем поступала в буферную емкость. После выдерживания сгущенная молочная сыворотка, прошедшая предварительную кристаллизацию, поступала в третью секцию скребкового пластинчатого теплообменника, где нагревалась до температуры 45÷55 °С, после чего могла подаваться на сушку.

Во время процесса кристаллизации на каждом этапе отбирались пробы продукта и в них определялся линейный размер кристаллов лактозы, рассчитывалась их средняя величина и количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние.

Результаты исследований зависимости количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, от температуры с внесением затравки и без показали, что разница значений минимальна. Полученные результаты позволяют сделать практический вывод о необязательности внесения затравки при проведении процесса предварительной кристаллизации в промышленных условиях.

И первый и второй варианты проведения предварительной кристаллизации лактозы может быть использован в промышленных условиях при различных технологических схемах подачи сыворотки на сушку

В результате проведенных исследований было установлено, что поточный способ кристаллизации лактозы позволяет улучшить качество подаваемой на сушку сгущенной сыворотки за счет трех-четырех кратного уменьшения среднего размера кристаллов лактозы по сравнению с периодическим способом.

На основании результатов опытно-промышленной проверки комиссия считает, что предложенный поточный способ кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке является перспективным и может быть рекомендован для применения в производстве.

Председатель комиссии:
Главный инженер ОАО «УОМЗ
«ВГМХА им. Верещагина» В.П. Черник

Члены комиссии:
Начальник производства ОАО «УОМЗ
«ВГМХА им. Верещагина», к.т.н. Ж.Ю. Кузнецова

Главный механик ОАО «УОМЗ
«ВГМХА им. Верещагина» А.А. Фомичев

Заведующий кафедрой технологического
оборудования «ВГМХА им. Верещагина»,
к.т.н. В.Г. Куленко

Профессор кафедры технологического
оборудования
«ВГМХА им. Верещагина», д.т.н. А.И. Гнездилова

Заведующий лабораторией молочных
консервов ФГБНУ ВНИМИ, д.т.н. В.В. Червецов

аспирант ФГБНУ ВНИМИ А.С. Бредихин

Приложение 5

МОЛМАШ

Федеральное государственное унитарное предприятие
экспериментальный завод «Молмаш»
(ФГУП ЭЗ «Молмаш»)
Добролюбова ул., д. 8А, Москва,127254.
Тел./факс (495) 787-01-41, 787-90-41, 618-13-35
e-mail: torgdom@molmash.ru http://www.molmash.ru
ОКПО 00242016, ОГРН 1027739780639, ИНН/КПП 7715080783/771501001

Исх. № 179/14
От «25» 09 2014 г.

Директору ФГБНУ «ВНИМИ»
Научно-техническое
обеспечение
молочной промышленности,
д-ру техн. наук Харитонову Д.В.

Аспирантом ФГБНУ «ВНИМИ» Бредихиным А.С. передана в ФГУП «Молмаш» ФАНО России, разработанная методика инженерного расчёта пластинчатого скребкового теплообменника для поточной кристаллизации лактозы сгущённой молочной сыворотки. Особенность данной методики инженерного расчёта заключается в том, что она разработана для высококонцентрированных лактозосодержащих растворов, таких как сгущённая молочная сыворотка, с массовой долей сухих веществ 50-60 %, которая в зависимости от температуры ведёт себя как псевдопластичная жидкость, не имеющая предела текучести, и отличающаяся снижением кажущейся вязкости с увеличением скорости сдвига.

Настоящая методика инженерного расчёта будет использована при модернизации и разработке соответствующего оборудования.

Главный инженер П.В. Карцев

Главный технолог О.А. Гераймович

Руководитель службы качества В.И. Тарасюк

Приложение 6

	сыворотка					хладоноситель			
G кг./ч.	**СВ, %**	**$t_{вх1}$, °С**	**$t_{вых1}$, °С**	**$t_{вых}^{РПА}$, °С**	**$t_{вых2}$, °С**	**$t^{ох}_{вх1}$, °С**	**$t^{ох}_{вых1}$, °С**	**$t^{ох}_{вх2}$, °С**	**$t^{ох}_{вых2}$, °С**
200	50	65	37	37,9	12,5	8	14,5	8	14,4
	55	64,9	42,5	43,7	12	8,1	14	8,1	13,9
	60	65	47	48,1	12	8	15	8	14,9
	50	63	36,2	36,9	12	8,3	14,5	8	14,4
	55	62,5	41,1	42	12,2	8	15	8	14,1
	60	61,4	44,3	45,1	12,1	8,2	14	8,2	13,9
	50	60	37,5	38,6	11,9	8,2	14,7	8,2	14,8
	55	61,4	38,9	39,7	12,3	8,1	14,8	8,3	14,8
	60	62,9	44,9	45,8	12,6	8,3	15,2	8	15,1
	сыворотка					**хладоноситель**			
G кг./ч.	**СВ, %**	**$t_{вх1}$, °С**	**$t_{вых1}$, °С**	**$t_{вых}^{РПА}$, °С**	**$t_{вых2}$, °С**	**$t^{ох}_{вх1}$, °С**	**$t^{ох}_{вых1}$, °С**	**$t^{ох}_{вх2}$, °С**	**$t^{ох}_{вых2}$, °С**
250	50	64.8	37,2	37,8	12,5	8,2	14,5	8,2	14,4
	55	63,5	42,6	43,4	12	8,1	14	8,1	13,9
	60	63,6	47,1	48,1	12,1	8,3	14,8	8,3	14,8
	50	63	36,2	36,9	12	8,3	14,5	8,3	14,4
	55	62,5	41,1	42	12,2	8	15	8	14,1
	60	61,4	44,3	45,1	12,1	8,2	14	8,2	13,9
	50	63,5	37,2	38,6	12,1	8,3	15,2	8,3	14,1
	55	62,4	40,2	41,3	12	8,1	14,1	8,1	14,5
	60	63,9	43,9	44,8	12,3	8,1	14	8,1	14,4
	сыворотка					**хладоноситель**			
G кг./ч.	**СВ, %**	**$t_{вх1}$, °С**	**$t_{вых1}$, °С**	**$t_{вых}^{РПА}$, °С**	**$t_{вых2}$, °С**	**$t^{ох}_{вх1}$, °С**	**$t^{ох}_{вых1}$, °С**	**$t^{ох}_{вх2}$, °С**	**$t^{ох}_{вых2}$, °С**
300	50	65	37	37,9	12,5	8	14,5	8	14,4
	55	64,4	42,5	43,7	12,1	8,1	14	8,1	13,9
	60	62,5	47	48,1	12	8	15	8	14,1
	50	63	36,2	36,8	12	8,3	14,5	8,3	14,4
	55	62,5	41,1	42,2	12,2	8	15	8	14,1
	60	61,4	44,3	44,9	12	8,2	14	8,2	13,9
	50	60	37,5	38,6	12,4	8,4	14,6	8,4	14,3
	55	61,4	39,7	39,7	12,3	8,1	14,8	8,1	14,8
	60	62,9	44,8	45,6	12,6	8,3	15,2	8,3	14,1

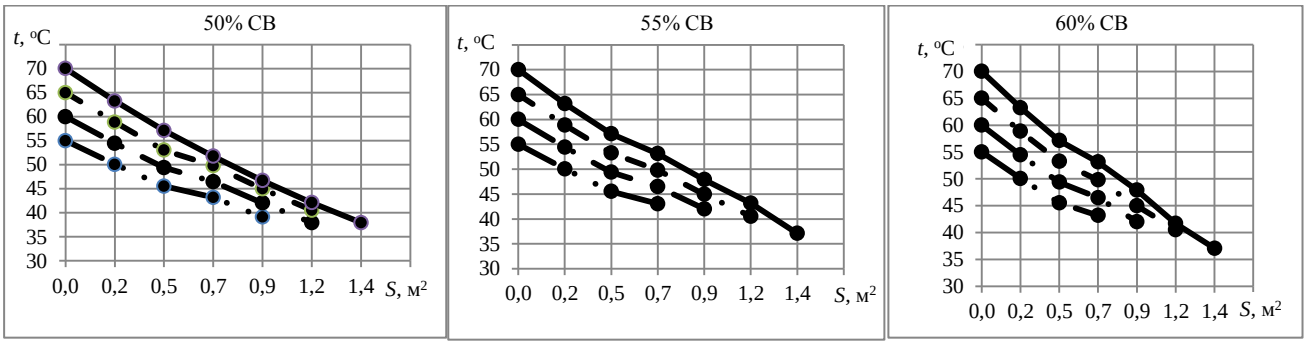
Сухие вещества, %	Температура, °С	Лактозное число
50	37	41,2
53	40	44,1
55	42,5	46,1
58	45	49,2
60	47	51,2

50% СВ				55% СВ				60% СВ			
после РПА		на вых. из II с.		после РПА		на вых. из II с.		после РПА		на вых. из II с.	
n,с$^{-1}$	$K\cdot10^{-4}$, шт/мм^3	n,с$^{-1}$	$K\cdot10^{-4}$, шт/мм^3	n,с$^{-1}$	$K\cdot10^{-4}$, шт/мм^3	n,с$^{-1}$	$K\cdot10^{-4}$, шт/мм^3	n,с$^{-1}$	$K\cdot10^{-4}$, шт/мм^3	n,с$^{-1}$	$K\cdot10^{-4}$, шт/мм^3
9,6	200	9,6	670	9,6	240	9,6	710	9,6	280	9,6	750
12,8	270	12,8	730	12,8	300	12,8	770	12,8	340	12,8	820
14,4	400	14,4	920	14,4	450	14,4	970	14,4	500	14,4	1 020
16	620	16	1 300	16	730	16	1 380	16	820	16	1 520

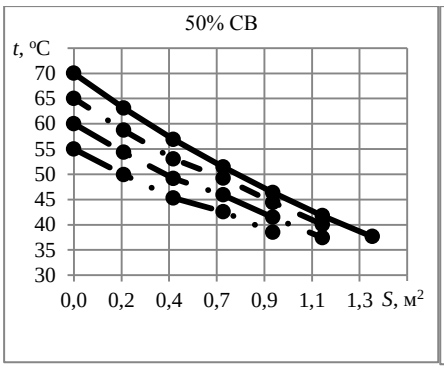
50% СВ				55% СВ				60% СВ			
после РПА		на вых. из II с.		после РПА		на вых. из II с.		после РПА		на вых. из II с.	
n,с$^{-1}$	$D_{ср}$, мкм	n,с$^{-1}$	$D_{ср}$, мкм	n,с$^{-1}$	$D_{ср}$, мкм	n,с$^{-1}$	$D_{ср}$, мкм	n,с$^{-1}$	$D_{ср}$, мкм	n,с$^{-1}$	$D_{ср}$, мкм
9,6	7,8	10	6,4	9,6	8,0	10	6,6	10	8,4	10	6,8
12,8	7,0	13	5,5	12,8	7,1	13	5,6	13	7,3	13	5,8
14,4	6,7	14	5,2	14,4	6,8	14	5,4	14	7,0	14	5,5
16	6,4	16	5,1	16,0	6,5	16	5,1	16	6,6	16	5,2

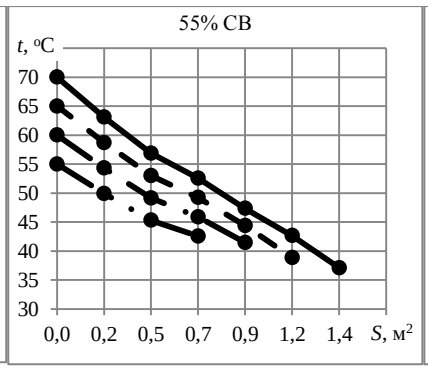
Приложение 7

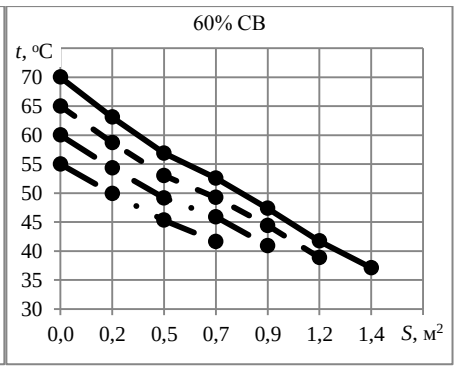
50% СВ		55% СВ		60% СВ	
***S*, м^2**	***t*, °С**	***S*, м^2**	***t*, °С**	***S*, м^2**	***t*, °С**
0	55	0	55	0	55
0,234	50,06	0,234	50,06	0,234	50,06
0,468	45,53	0,468	45,53	0,468	45,53
0,702	43,19	0,702	43,19	0,702	43,05
0,936	39,09	-	-	-	-
***S*, м^2**	***t*, °С**	***S*, м^2**	***t*, °С**	***S*, м^2**	***t*, °С**
0	60	0	60	0	60
0,234	54,46	0,234	54,46	0,234	54,45
0,468	49,39	0,468	49,39	0,468	49,39
0,702	46,48	0,702	46,48	0,702	46,48
0,936	42,02	0,936	42,017	0,936	42,02
1,17	37,93	-	-	-	-
***S*, м^2**	***t*, °С**	***S*, м^2**	***t*, °С**	***S*, м^2**	***t*, °С**
0	65	0	65	0	65
0,234	58,86	0,234	58,86	0,234	58,86
0,468	53,02	0,468	53,26	0,468	53,26
0,702	49,8	0,702	49,8	0,702	49,8
0,936	44,96	0,936	44,96	0,936	44,96
1,17	40,54	1,17	40,54	1,17	40,54
***S*, м^2**	***t*, °С**	***S*, м^2**	***t*, °С**	***S*, м^2**	***t*, °С**
0	70	0	70	0	70
0,234	63,25	0,234	63,25	0,234	63,2
0,468	57,12	0,468	57,12	0,468	57,12
0,702	51,76	0,702	53,13	0,702	53,13
0,936	46,7	0,936	47,9	0,936	47,9
1,17	42,11	1,17	41,7	1,17	43,16
1,404	37,94	1,404	37,08	1,404	37,08



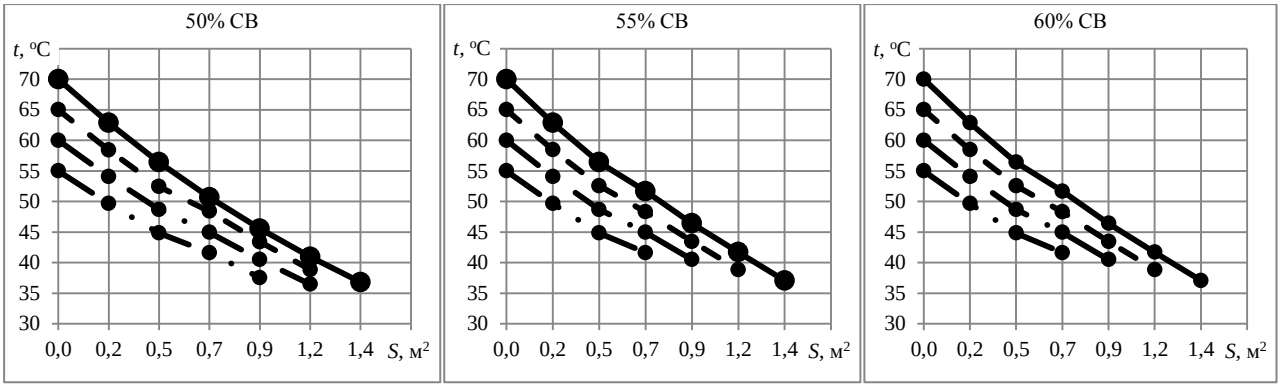
50% СВ		55% СВ		60% СВ	
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	55	0	55	0	55
0,234	49,92	0,234	49,92	0,234	49,92
0,468	45,29	0,468	45,29	0,468	45,29
0,702	42,57	0,702	42,57	0,702	41,62
0,936	38,51	-	-	-	-
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	60	0	60	0	60
0,234	54,32	0,234	54,32	0,234	54,32
0,468	49,15	0,468	49,15	0,468	49,15
0,702	45,89	0,702	45,89	0,702	45,89
0,936	41,45	0,936	41,45	0,936	40,91
1,17	37,42	-	-	-	-
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	65	0	65	0	65
0,234	58,71	0,234	58,71	0,234	58,71
0,468	53,02	0,468	53,02	0,468	53,02
0,702	49,22	0,702	49,22	0,702	49,22
0,936	44,4	0,936	44,4	0,936	44,4
1,17	40,03	1,17	38,85	1,17	38,85
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	70	0	70	0	70
0,234	63,11	0,234	63,11	0,234	63,11
0,468	56,88	0,468	56,88	0,468	56,88
0,702	51,43	0,702	52,56	0,702	52,56
0,936	46,36	0,936	47,35	0,936	47,35
1,17	41,78	1,17	42,65	1,17	41,7
1,404	37,65	1,404	37,08	1,404	37,08



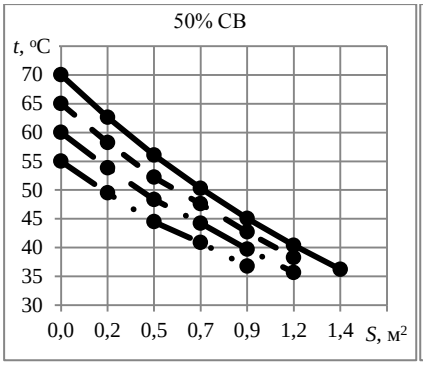


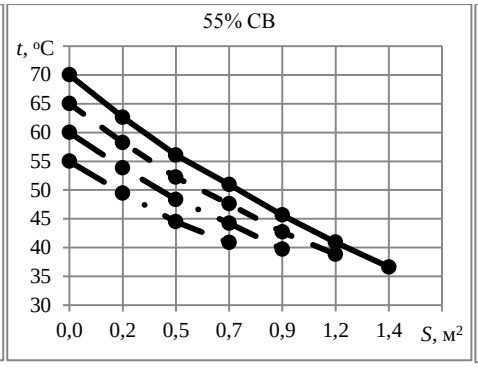


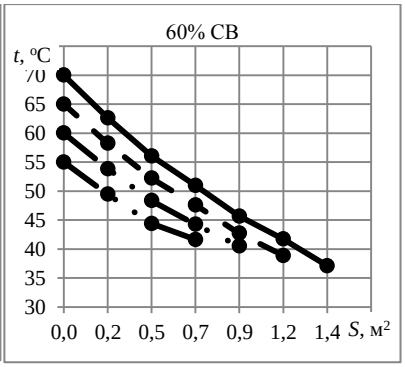
50% СВ		55% СВ		60% СВ	
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	55	0	55	0	55
0,234	49,66	0,234	49,66	0,234	49,66
0,468	44,84	0,468	44,84	0,468	44,84
0,702	41,62	0,702	41,62	0,702	41,62
0,936	37,54	-	-	-	-
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	60	0	60	0	60
0,234	54,06	0,234	54,06	0,234	54,06
0,468	48,7	0,468	48,7	0,468	48,7
0,702	44,96	0,702	44,96	0,702	44,96
0,936	40,49	0,936	40,49	0,936	40,49
1,17	36,46	-	-	-	-
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	65	0	65	0	65
0,234	58,41	0,234	58,45	0,234	58,45
0,468	52,45	0,468	52,57	0,468	52,57
0,702	48,42	0,702	48,31	0,702	48,31
0,936	43,4	0,936	43,45	0,936	43,45
1,17	38,85	1,17	38,85	1,17	38,85
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	70	0	70	0	70
0,234	62,85	0,234	62,85	0,234	62,85
0,468	56,43	0,468	56,43	0,468	56,43
0,702	50,69	0,702	51,67	0,702	51,67
0,936	45,55	0,936	46,41	0,936	46,41
1,17	40,94	1,17	42,65	1,17	41,7
1,404	36,81	1,404	37,08	1,404	37,08



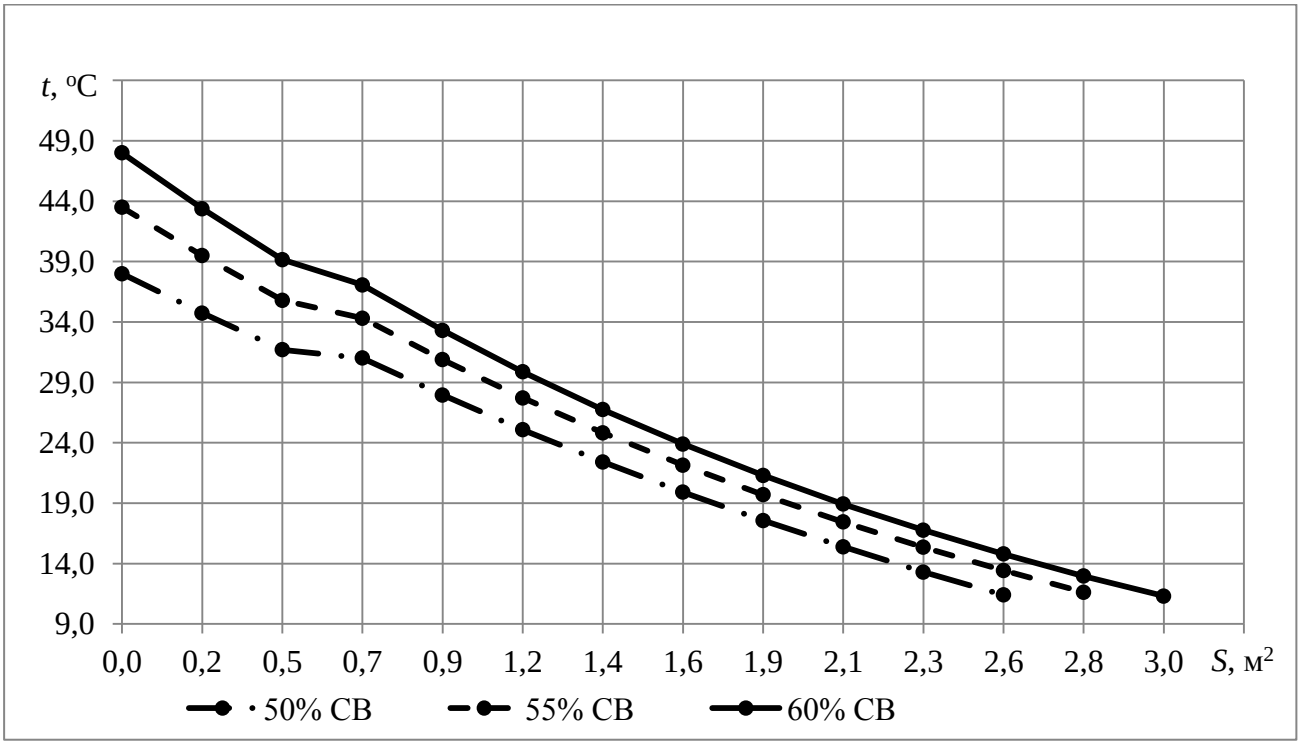
50% СВ		55% СВ		60% СВ	
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	55	0	55	0	55
0,234	49,49	0,234	49,45	0,234	49,45
0,468	44,47	0,468	44,47	0,468	44,39
0,702	40,88	0,702	40,88	0,702	41,62
0,936	36,76	-	-	-	-
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	60	0	60	0	60
0,234	53,84	0,234	53,84	0,234	53,84
0,468	48,34	0,468	48,34	0,468	48,34
0,702	44,24	0,702	44,24	0,702	44,24
0,936	39,72	0,936	39,72	0,936	40,49
1,17	35,68	-	-	-	-
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	65	0	65	0	65
0,234	58,24	0,234	58,24	0,234	58,24
0,468	52,2	0,468	52,2	0,468	52,2
0,702	47,6	0,702	47,6	0,702	47,6
0,936	42,69	0,936	42,69	0,936	42,69
1,17	38,29	1,17	38,85	1,17	38,85
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	70	0	70	0	70
0,234	62,63	0,234	62,63	0,234	62,63
0,468	56,06	0,468	56,06	0,468	56,06
0,702	50,3	0,702	50,97	0,702	50,97
0,936	45,06	0,936	45,66	0,936	45,66
1,17	40,4	1,17	40,91	1,17	41,7
1,404	36,23	1,404	36,61	1,404	37,08



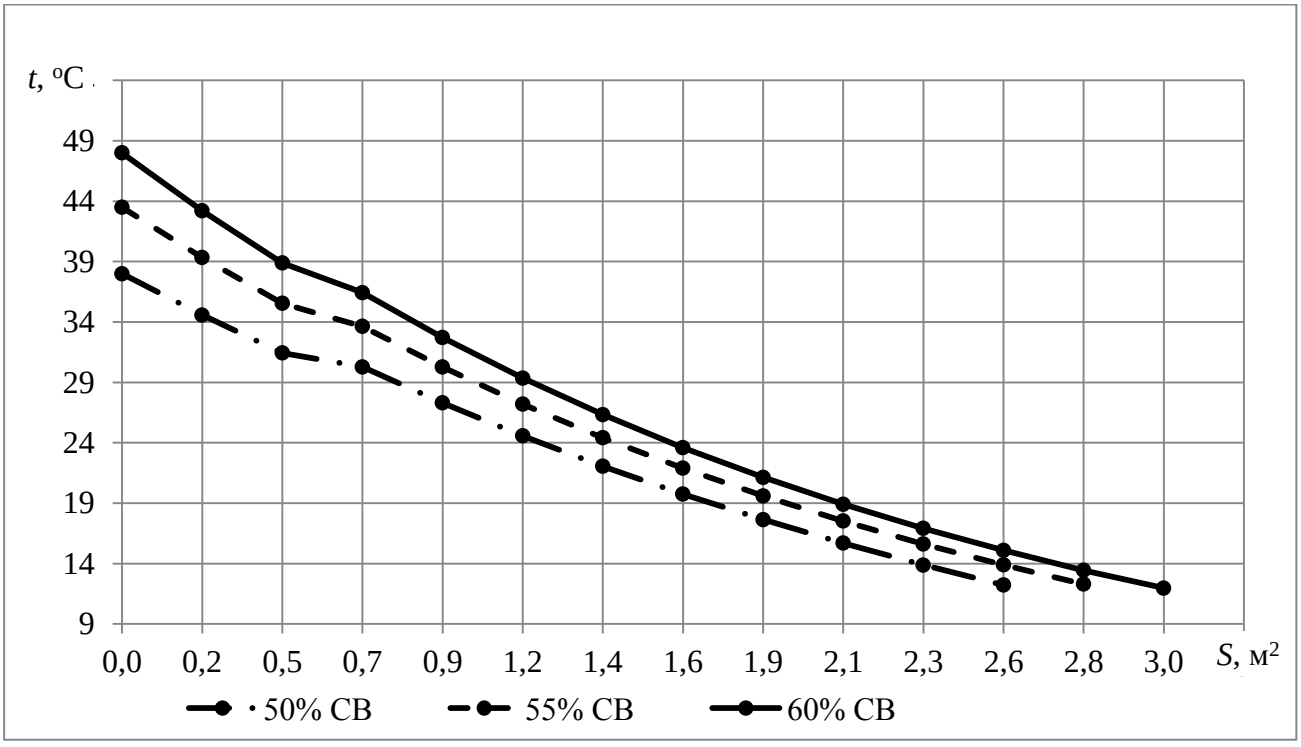




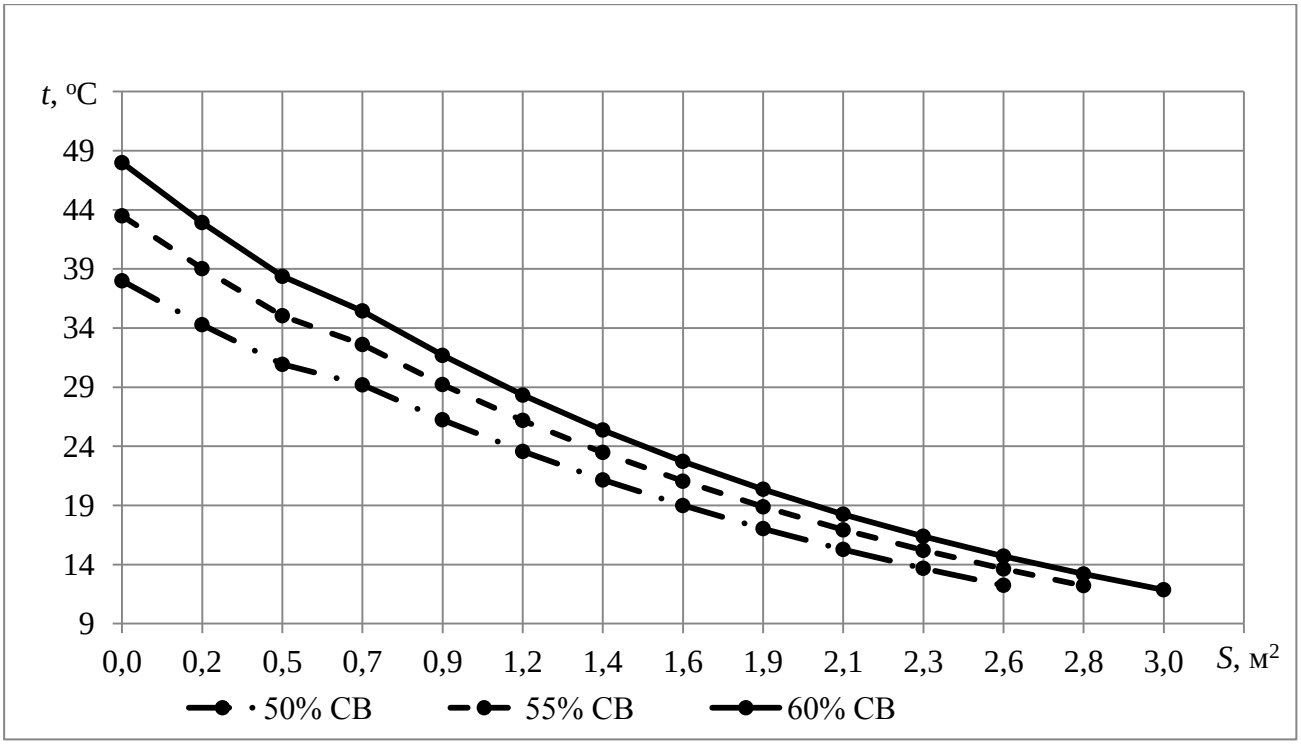
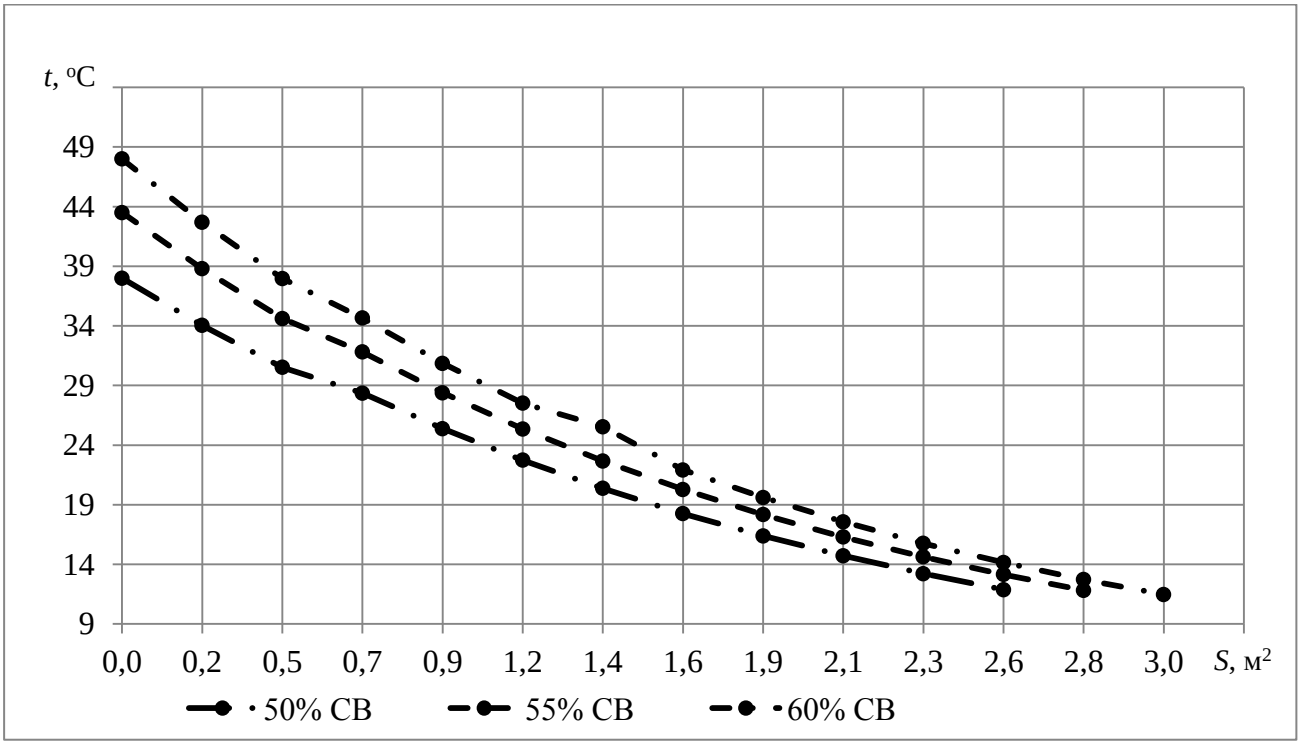
50% СВ		55% СВ		60% СВ	
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	38,0	0	43,5	0,0	48,0
0,234	34,7	0,234	39,5	0,234	43,4
0,468	31,7	0,468	35,8	0,468	39,2
0,702	31,0	0,702	34,3	0,702	37,1
0,936	28,0	0,936	30,9	0,936	33,3
1,170	25,1	1,170	27,7	1,170	29,9
1,404	22,4	1,404	24,8	1,404	26,8
1,638	19,9	1,638	22,2	1,638	23,9
1,872	17,6	1,872	19,7	1,872	21,3
2,106	15,4	2,106	17,4	2,106	18,9
2,340	13,3	2,340	15,4	2,340	16,8
2,574	11,4	2,574	13,4	2,574	14,8
		2,808	11,6	2,808	13,0
				3,042	11,3



50% СВ		55% СВ		60% СВ	
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	38	0	43,50	0	48
0,23	34,58	0,23	39,33	0,23	43,21
0,47	31,44	0,47	35,54	0,47	38,89
0,70	30,29	0,70	33,64	0,70	36,43
0,94	27,31	0,94	30,27	0,94	32,71
1,17	24,57	1,17	27,20	1,17	29,36
1,40	22,06	1,40	24,42	1,40	26,33
1,64	19,75	1,64	21,90	1,64	23,60
1,87	17,64	1,87	19,60	1,87	21,14
2,11	15,69	2,11	17,52	2,11	18,92
2,34	13,88	2,34	15,62	2,34	16,91
2,57	12,22	2,57	13,90	2,57	15,10
		2,81	12,31	2,81	13,45
				3,04	11,97



50% СВ		55% СВ		60% СВ	
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	38	0	43,5	0	48,00
0,234	34,28	0,23	39,03	0,23	42,92
0,468	30,94	0,47	35,04	0,47	38,39
0,702	29,2	0,70	32,61	0,70	35,44
0,936	26,24	0,94	29,22	0,94	31,69
1,170	23,57	1,17	26,19	1,17	28,34
1,404	21,16	1,40	23,48	1,40	25,37
1,638	19,00	1,64	21,06	1,64	22,72
1,872	17,04	1,87	18,89	1,87	20,36
2,106	15,28	2,11	16,94	2,11	18,25
2,340	13,68	2,34	15,2	2,34	16,38
2,574	12,24	2,57	13,64	2,57	14,70
		2,81	12,22	2,81	13,20
				3,04	11,86



50% СВ		55% СВ		60% СВ	
***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**	***S*, м^2**	***t*, ^{o}C**
0	38	0	43,5	0	48
0,23	34,04	0,23	38,79	0,23	42,68
0,47	30,52	0,47	34,62	0,47	37,97
0,70	28,36	0,70	31,81	0,70	34,65
0,94	25,38	0,94	28,39	0,94	30,86
1,17	22,73	1,17	25,36	1,17	27,51
1,40	20,37	1,40	22,67	1,40	25,54
1,64	18,26	1,64	20,28	1,64	21,92
1,87	16,39	1,87	18,17	1,87	19,61
2,11	14,72	2,11	16,3	2,11	17,57
2,34	13,22	2,34	14,63	2,34	15,76
2,57	11,88	2,57	13,15	2,57	14,16
		2,81	11,83	2,81	12,73
				3,04	11,47