

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГИЙ И  
УПРАВЛЕНИЯ имени К.Г. Разумовского»  
(Первый казачий университет)

*На правах рукописи*



МИТРОШИНА ДАРЬЯ ПЕТРОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ  
САХАРОЗЫ С УЛУЧШЕНИЕМ ЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Специальность 4.3.3. – Пищевые системы

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Доктор технических наук, профессор,  
Лауреат общенациональной премии  
«Профессор года» в номинации  
«Технические науки»,  
Заслуженный изобретатель РСФСР  
Славянский А.А.

Москва, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО БЕЛОГО САХАРА</b> .....	9
1.1. Сахар белый и основные требования к его безопасности .....	9
1.2. Физико-химические основы процесса кристаллизации сахарозы .....	16
1.3. Основные представления о процессе разделения утфеля I кристаллизации в поле действия центробежных сил .....	21
1.4. Технологические схемы и способы кристаллизации сахара .....	29
1.5. Анализ технологий производства сахаросодержащих продуктов .....	32
1.6. Формулирование цели и задач проведения теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации .....	35
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА САХАРА БЕЛОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО</b> .....	38
2.1. Теоретические и экспериментальные аспекты исследования качества сахара.....	40
2.2. Методы исследования и их основное содержание .....	41
2.3. Специальные методы исследования.....	43
2.4. Качество сахара и его соответствие требованиям стандартов .....	51
<b>ГЛАВА 3. КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ САХАРОЗЫ ИЗ ПЕРЕСЫЩЕННЫХ РАСТВОРОВ УТФЕЛЯ I КРИСТАЛЛИЗАЦИИ</b> ...	63
3.1. Обоснование диффузионной теории роста кристаллов из пересыщенных растворов.....	63
3.2. Оценка влияния теплоты кристаллообразования на диффузионный перенос молекул сахарозы .....	65
3.4. Разработка эффективной технологии уваривания утфеля I кристаллизации .....	76
<b>ГЛАВА 4. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОРОДНЫХ ЦЕНТРОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ САХАРОЗЫ</b> .....	84
4.1. Математическое моделирование процесса фракционирования затравочных центров кристаллизации.....	89
4.2. Применение сепарирования для формирования центров кристаллизации.....	103

4.3. Усовершенствование технологии уваривания утфеля I кристаллизации .....	106
<b>ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ САХАРОЗЫ .....</b>	<b>111</b>
5.1. Разработка комплексной технологии уваривания утфеля I кристаллизации .....	111
5.2. Разработка новых видов продукции на основе сахарозы .....	125
5.4. Исследование структурных и термических свойств гранулированных сахаросодержащих продуктов .....	132
<b>ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ .....</b>	<b>142</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>144</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>167</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** В настоящее время в России заметно возрос интерес к проблеме здорового питания, как к одному из важнейших факторов повышения уровня жизни населения, что согласуется с Доктриной продовольственной безопасности до 2030 г, определившей основные направления развития пищевой индустрии и требования к безопасности выпускаемой продукции [140]. Из данного государственного документа следует, что стратегической задачей государства является производство социальнозначимых продуктов питания, к которым также относится кристаллический белый сахар.

Белый сахар является товаром потребительского назначения и одновременно применяется в производстве различных продуктов питания (кондитерских изделий, напитков, молочной продукции и др.). Сфера использования белого сахара не ограничивается только пищевыми свойствами, поскольку его также применяют в фармацевтической, биохимической, табачной и других отраслях промышленности. Сахар обладает высокой транспортабельностью и способностью к длительному хранению, что дает возможность обеспечивать его продовольственные и национальные запасы [34,35].

Повышение требований потребителей к выходу, качеству и безопасности сахара, в том числе для различной пищевой продукции на его основе, диктует необходимость дальнейшего совершенствования технологии его производства.

Наиболее наукоемким этапом производства белого сахара является процесс его кристаллизации. Его осуществляют при уваривании утфеля I продукта под разряжением из пересыщенных растворов. Несмотря на наличие большого количества научных разработок возможности совершенствования этого процесса далеко еще не исчерпаны.

В направлении развития процессов сахарного производства, в частности, в области совершенствования процесса кристаллизации сахарозы значительный вклад внесли П.М.Силин, И.Н.Каганов, А.Р.Сапронов, Е.В.Семенов,

А.А.Славянский, В.И. Тужилкин, В.О.Штангеев, Р.С. Решетова и др. [51,103,107,113, 121,139,155].

Увеличение выхода кристаллического сахара с одновременным решением вопросов его качества и безопасности можно обеспечить путем разработки новых технологических решений в области уваривания утфеля I кристаллизации, что подтверждает значимость подобных исследований.

Известно, что потребность в белом сахаре составляет не менее 10% от суточной калорийности рациона питания человека [69]. Сахар, как пищевой продукт, считается эффективным источником энергии для поддержания клеток организма и особенно мозга человека. Он входит в группу продуктов питания социального назначения. Вместе с тем ассортимент сахаросодержащей продукции в питании человека весьма ограничен. С этих позиций, создание на основе сахара продуктов пищевого назначения с улучшенными технологическими свойствами весьма актуально. Теоретические и практические аспекты улучшения технологических свойств сахарозы рассмотрены в трудах С.М. Петрова, Н.М. Подгорновой, Н.Д. Лукина, Н.Г. Кульневой, Л.И. Беляевой, Ю.И. Сидоренко, С.В. Штермана и др.

В связи с этим повышение эффективности сахарного производства, качества и безопасности белого сахара, а также улучшение его технологических свойств является весьма актуальной задачей, стоящей перед сахарной отраслью.

**Цель исследования** – совершенствование технологии кристаллизации сахарозы из пересыщенных производственных растворов с улучшением ее технологических свойств.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие **задачи**:

1. Критически проанализировать качественные показатели белого сахара отечественных свеклосахарных предприятий и уточнить степень их соответствия нормативным требованиям (ГОСТ 33222-2015);
2. Усовершенствовать физико-математическую модель формирования центров кристаллизации сахарозы с учетом влияния теплоты кристаллообразования на процесс уваривания утфеля I кристаллизации;

3. Научно обосновать технологические условия фракционирования центров кристаллизации для повышения их однородности с применением сепарационных технологий;

4. Разработать и запатентовать инновационные разработки в области кристаллизации сахарозы при уваривании утфеля и отделения из него кристаллов сахара в центробежном силовом поле;

5. Разработать комплексную технологию на базе основных операций процесса уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации для повышения выхода и качества белого сахара при переработке сырья различной сахаристости;

6. Обосновать условия улучшения технологических свойств белого сахара;

7. Исследовать технологические свойства гранулированного сахаросодержащего продукта.

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Результаты анализа степени соответствия качественных показателей, вырабатываемого отечественными заводами кристаллического белого сахара требованиям ГОСТ 33222-2015;

2. Физико-математическая модель кристаллизации сахарозы из пересыщенных производственных растворов при уваривании утфеля I продукта в вакуум-аппарате с уточнением требований к формированию центров ее кристаллизации;

3. Результаты оценки влияния теплоты кристаллообразования на кинетику роста кристаллов сахарозы из пересыщенных промышленных растворов;

4. Фракционирование затравочных кристаллов с использованием сепарирования для повышения их однородности;

5. Комплексная технология получения кристаллического белого сахара, обеспечивающая повышение качества и выхода сахара при переработке сырья различной сахаристости;

6. Технология производства гранулированного сахарсодержащего продукта, обогащенного натуральными ингредиентами растительного происхождения;

7. Результаты исследования технологических свойств гранулированного сахарсодержащего продукта.

**Научная новизна** состоит в развитии известных теоретических и практических представлений о формировании однородных центров кристаллизации сахарозы и кинетике их роста в пересыщенных промышленных растворах, анализе основных факторов, влияющих на этот процесс, и на их основе раскрытие и обоснование технологических условий, обеспечивающих повышение эффективности технологии уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации.

Усовершенствована физико-математическая модель процесса формирования центров кристаллизации сахарозы из пересыщенных производственных растворов;

Охарактеризовано влияние внутренней теплоты пересыщенных производственных растворов на кинетику роста кристаллов в процессе кристаллообразования;

С позиций повышения однородности распределения по крупности центров кристаллизации исследован процесс фракционирования затравочного материала путём центробежного сепарирования;

Научно обоснована эффективность основных технологических операций уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации в продуктовом отделении сахарного завода для условий переработки сырья различной сахаристости;

Сформулированы и обоснованы технологические условия создания гранулированных сахарсодержащих продуктов;

Исследованы технологические свойства гранулированного сахарсодержащего продукта.

### **Практическая значимость и реализация результатов работы:**

1. Проведена оценка качества, вырабатываемого отечественными сахарными заводами белого сахара с позиций его пищевой и сырьевой значимости. Уточнены технологические условия, обеспечивающие повышение выхода и качества сахара;
2. На основе результатов сепарирования маточного утфеля разработана методика и способ классифицирования затравочных центров кристаллизации с повышением их однородности;
3. Проведены испытания способов уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации в производственных условиях;
4. Сформулирован и обоснован комплексный подход к технологии получения утфеля I кристаллизации на основе использования инновационных разработок в области его уваривания и центрифугирования;
5. Разработана технология обогащения и производства новых видов гранулированных сахаросодержащих продуктов.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты обсуждались на научно-технических конференциях: XIII Всероссийский форум молодых ученых и студентов «Дни студенческой науки» 05–09 апреля 2021 года; Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова 06–08 июня 2022 года.

Публикации. По теме диссертационной работы имеется 20 публикаций, в том числе 8 статей в журналах, рекомендуемых ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 2 статьи в журналах, входящих в международные базы цитирования WoS/Scopus, 9 патентов РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает введение, 5 глав, выводы и рекомендации промышленности, список литературы и приложения. Она изложена на 167 страницах, иллюстрирована 31 рисунком и 25 таблицами. В список литературы входит 200 источников, из которых 163 отечественных и 37 иностранных.

# **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО БЕЛОГО САХАРА**

## **1.1. Сахар белый и основные требования к его безопасности**

Большое влияние на жизнеспособность, работоспособность и устойчивость организма человека к условиям окружающей среды оказывает питание и именно поэтому оно имеет важное социальное значение. При этом исходным материалом для формирования, функционирования и поддержания здоровья организма являются пищевые продукты.

В состав продуктов питания должны входить в необходимом количестве белки, жиры, углеводы, витамины, минеральные и другие вещества. В питании человека наиболее оптимальным является соотношение белков, жиров и углеводов в количестве 1:1:4 (на 1 г белка рекомендуется употреблять 1 г жира и 4 г углеводов), т.е. питание человека имеет в основном углеводную ориентацию. Причем одним из значимых энергетических источников питания для обеспечения жизнедеятельности человека является кристаллический белый сахар.

От организации питания человека во многом зависит нормальное течение процессов жизнедеятельности его организма. В соответствии с современными взглядами о безопасности продуктов питания, особенно высокого социального значения, и здоровья людей особое значение приобретает производство пищевых продуктов, обладающих необходимыми потребительскими свойствами.

Сегодня проблеме безопасности и повышения качества продукции уделяется повышенное внимание в концептуальных, стратегических и нормативно-правовых документах Российской Федерации. К ним относится Федеральный закон №29-ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов» от 02.01.2000 г. [143]. Согласно ему «качество пищевых продуктов – это совокупность характеристик пищевых продуктов, способных удовлетворять потребности человека в пище при обычных условиях их использования».

Наиболее строгие требования к качеству продуктов питания обоснованы и раскрыты в утвержденной распоряжением Правительства РФ №1364-р от

29.06.2016 г. «Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года» [140]. В этом документе под качеством пищевой продукции понимается «совокупность характеристик пищевой продукции, соответствующих заявленным требованиям и включающих ее безопасность, потребительские свойства, энергетическую и пищевую ценность, аутентичность, способность удовлетворять потребности человека в пище при обычных условиях использования в целях обеспечения сохранения здоровья человека». Стоит отметить, что особое внимание в Стратегии отводится безопасности пищевой продукции, как составляющей ее качества.

Проблема качества пищевой продукции тесно связана с понятием о ее безопасности. К тому же обеспечение безопасности пищевой продукции является обязательным требованием Таможенного союза и регламентируется его технологическими регламентами [137]. В них под безопасностью пищевой продукции понимается «то ее состояние, когда отсутствуют риски вредного воздействия ее на человека и будущие его поколения». Однако современные традиционные подходы к контролю качества пищевых продуктов не в состоянии решать проблемы ее безопасности. Это обусловлено тем, что в них отсутствуют предупреждающие принципы возможности их появления.

Современные представления о безопасности пищевой продукции свидетельствуют о недопустимости риска, вредного воздействия на здоровье человека, так как оно в перспективе создает угрозу для жизни и здоровья человека. Ввиду этого под обеспечением безопасности пищевой продукции понимают требования соответствия нормативной документации ее производству и реализации в торговой сети.

Белый сахар представляет собой углеводный пищевой продукт, состоящий из сахарозы ( $C_6H_{12}O_6$ ) [23]. Его относят к продуктам массового потребления и используют непосредственно в рационе питания, а также как сырьевой источник для технических целей. При этом сахару свойственна высокая транспортабельность и пригодность к длительному хранению. Он играет важную

роль в формировании социальнозначимых продовольственных запасов страны [45,60,64].

В соответствии с товароведной классификацией сахар относят к подгруппе кондитерских товаров. По пищевой ценности он близок, например, к леденцовой карамели и сахарному драже. Кроме того, сахар может быть положительно охарактеризован по ряду только ему свойственных особенностей. Таких как, например, пищевая ценность, органолептические свойства, функциональные особенности, традиции его использования с учетом принципов здорового питания.

Особую важность для потребителей белого сахара имеет его качество и безопасность [34,35,96,100]. Кроме того, как продукт питания, белый сахар не должен оказывать негативного влияния, токсического, канцерогенного и мутагенного воздействия на организм человека [63].

Страны – его производители, как правило, имеют свою нормативную документацию для обеспечения не только качества, но и безопасности сахара. Первым принятым на международном уровне документом считается Codex Alimentarius FAO/WHO (табл.1). Комиссия Codex Alimentarius была основана FAO в 1961 г. и основным направлением ее деятельности продолжает оставаться как защита здоровья потребителей, так и обеспечение справедливой практики в торговле пищевых продуктами.

Таблица 1 – Требования к качеству сахара в рекомендациях Codex Alimentarius [54]

Требования к качеству и безопасности	Класс	
	А	В
Массовая доля сахарозы, (в пересчете на сухое вещество), %, не менее	99,7	99,5
Массовая доля редуцирующих веществ (в пересчете на сухое вещество), %, не более	0,04	0,10
Массовая доля золы (в пересчете на сухое вещество), %, не более	0,04	0,10
Цветность, ед. ICUMSA, не более	60	150
Массовая доля влаги, %, не более	0,10	0,10
Содержание двуокиси серы, мг/кг, не более	15	70

В Европейской экономической директиве (ЕЭК), разработанной в 1973 году в отличие от Codex Alimentarius, предложено классифицировать сахар по четырем категориям. Сахар 4-й категории – тот, который не отнесен к категориям в соответствии с табл. 2 [34].

Таблица 2 – Показатели качества сахара, вырабатываемого в ЕС

Показатели качества	1-ая категория	2-ая категория	3-ая категория
Содержание сахарозы по прямой поляризации, %, не менее	99,7	99,7	99,7
Влажность, %, не более	0,06	0,06	0,06
Содержание инвертного сахара, %, не более	0,04	0,04	0,04
Содержание золы кондуктометрической, % к массе сахара, не более	0,0108	0,027	-
Цветность, не более			
- в растворе, ед. ICUMSA	22,5	45	-
- в кристаллическом виде, по эталонам	2	3,5	6

В настоящее время особое внимание уделяется вопросам соответствия отечественных и зарубежных требований к качеству сахара (страны-участники ВТО). Россия является не только страной-производителем белого сахара, но и его потребителем и интегрирована в международный рынок сахара. При этом имеет место конкуренция между отечественными и зарубежными производителями, что способствует повышению требований к качеству сахара и конкурентоспособности на мировом рынке [34,35,38].

В настоящее время в России контроль за качеством и безопасностью белого сахара осуществляется в соответствии с требованиями последнего ГОСТ 33222-2015 «Сахар белый. Технические условия» [23]. Он достаточно строго ограничивает требования по содержанию в сахаре диоксида серы и токсичных элементов, таких как ртуть, мышьяк, свинец, кадмий.

Одним из главных отличий ГОСТ 33222-2015 от ранее существовавшего ГОСТ 21-94 является изменение по трактовке терминологии на продукты свеклосахарного производства. Так, термин «сахар-песок» заменен на «белый сахар», а «сахар-рафинад» на «кусковой сахар».

В соответствии с ГОСТ 33222-2015 в России вырабатывают белый сахар следующих категорий: Экстра, ТС1, ТС2, ТС3 (табл.3). Причем данные категории имеют некоторые различия по физико-химическим показателям.

Таблица 3 – Физико-химические показатели качества белого сахара по ГОСТ 33222-2015

Наименование показателя	Значение по категориям кристаллического белого сахара			
	Экстра	ТС1	ТС2	ТС3
Массовая доля сахарозы по прямой поляризации, %, не менее	99,80	99,70	99,70	99,50
Массовая доля влаги, %, не более	0,10	0,10	0,12	0,15
Массовая доля редуцирующих веществ (в пересчете на сухое вещество), %, не более	0,03	0,035	0,04	0,065
Массовая доля золы (в пересчете на сухое вещество), %, не более	0,027	0,036	0,036	0,050
Цветность в растворе, единиц оптической плотности (ICUMSA), не более	45,0	60,0	104,0	195,0

В табл. 4 представлена сравнительная характеристика требований стандартов, предъявляемых к качественным показателям белого сахара.

Таблица 4 – Основные показатели качества сахара в различных стандартах

Наименование показателя	ГОСТ 21-94	ГОСТ 33222-2015, категория ТС2	Сахар II категории ЕС	Кодекс Alimentarius, класс А
Массовая доля сахарозы (в пересчете на сухое вещество), %, не менее	99,75	99,7	99,7	99,7
Массовая доля влаги, %, не более	0,14	0,12	0,1	0,1
Массовая доля золы (в пересчете на сухое вещество), %, не более	0,04	0,036	0,04	0,04
Массовая доля редуцирующих веществ (в пересчете на сухое вещество), %, не более	0,05	0,04	0,04	0,04
Цветность раствора, единиц оптической плотности (ед. ICUMSA), не более	104	104	60	60

Из табл. 4 видно, что по сравнению с ГОСТ 21-94 «Сахар-песок. Технические условия» действующий в настоящее время в России ГОСТ 33222-2015 вводит более строгие требования к белому сахару, гармонизируя их с соответствующими показателями стран Европейского Союза. Для обеспечения качества и безопасности продукции важно ее соответствие требованиям стандартов. Вместе с тем промышленные потребители сахара сами могут устанавливать требования, необходимые по их мнению.

Наиболее крупным потребителем сахара в России является кондитерское производство. Потребность этой отрасли в нем превышает 1 млн.т в год. С целью обеспечения высокого качества конечной продукции производители кондитерских изделий уделяют особое внимание наличию в сахаре азотсодержащих органических соединений, солей железа, углекислых солей щелочных металлов, а также его гранулометрическому составу, цветности, мутности, микрофлоре и буферности сахарсодержащих растворов [5,34,35,61,63,94, 96,128,158].

В производстве безалкогольных напитков качество белого сахара оценивают по таким показателям, как полнота вкуса и экстрактивность напитков. Кроме того, с учетом требований к безопасности пищевой продукции, в производстве напитков введены ограничения на содержание в них SO<sub>2</sub>, нерастворимых веществ и сапонины [60].

Кроме того, промышленные потребители сахара предъявляют высокие требования к содержанию в сахаре нерастворимых в воде частиц. Так, в соответствии с требованиями фирмы Master Food содержание в сахаре нерастворимых в воде частиц должно находиться в пределах 5–10 мг/кг, а диоксида серы не должно превышать 15 мг/кг. Причем оптимальное его количество составляет 10 мг/кг. При этом оговаривается также размер его кристаллов, который должен быть в диапазоне 0,40–0,85 мм [63,134,136].

При этом, как в производстве напитков, так и кондитерских изделий особое внимание обращают на наличие в сахаре флокулированных осадков (хлопьев).

По существующим представлениям наличие хлопьев в сахарсодержащих растворах в основном обусловлено двумя причинами [39]:

- образованием микрочастиц коллоидной дисперсности в растворах в результате взаимодействия разнозаряженных компонентов;

- коагулированием микрочастиц с образованием и укрупнением хлопьев.

Помимо этого, фирмы Master Food, компания Pepsi-Cola предъявляют более высокие требования к таким показателям качества сахара как цветность и мутность его растворов. Их значения не должны превышать 35 и 20 ед. ICUMSA соответственно [63].

Одной из наиболее важных производственных операций получения кристаллов сахара, заметно влияющих на формирование его качественных характеристик, является процесс кристаллизации сахарозы. Этот процесс имеет место при уваривании сахарсодержащих растворов в вакуум-аппаратах под разряжением.

## **1.2. Физико-химические основы процесса кристаллизации сахарозы**

Кристаллизация сахарозы представляет собой процесс образования кристаллов из пересыщенных сахарсодержащих растворов в специальном оборудовании – вакуум-аппаратах. В его основе лежит явление массопереноса, при котором молекулы сахарозы переносятся через границу раздела соприкасающихся жидкой и твердой фаз [1,12,13,46,98].

Сахароза кристаллизуется только из пересыщенных растворов. Степень пересыщения их выражают через коэффициент пересыщения ( $K_{пер}$ ). Этот коэффициент показывает на сколько больше растворено сахарозы в 1 кг воды в пересыщенном растворе по сравнению с насыщенном растворе при той же температуре. Достижение пересыщения в промышленном процессе кристаллообразования сахарозы и роста ее кристаллов достигается путем выпаривания влаги под разряжением в вакуум-аппаратах или при охлаждении утфеля в мешалках-кристаллизаторах [155].

При уваривании утфелей возможны три зоны пересыщения: стабильная, метастабильная, лабильная (рис. 1).

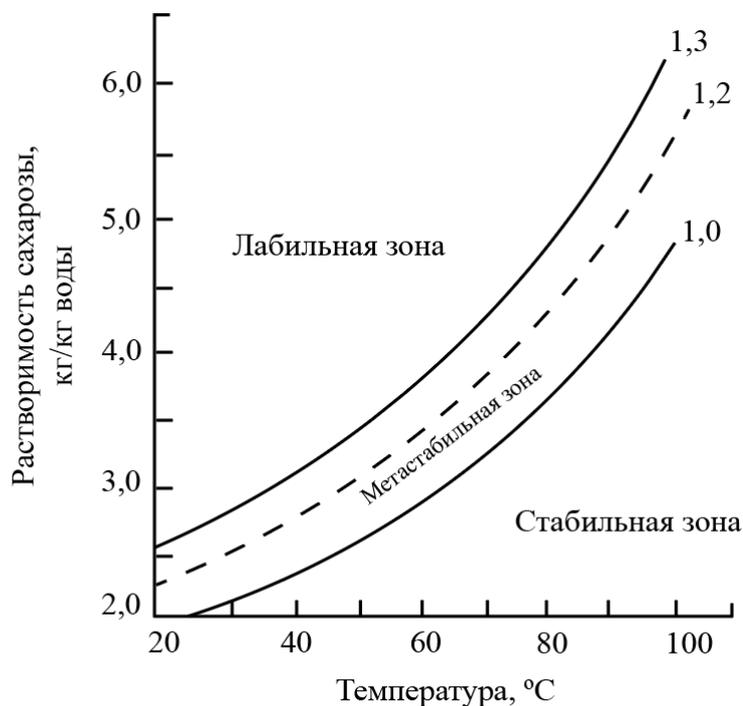


Рисунок 1 – Зависимость растворимости сахарозы от температуры:  
 $K_{пер} 1,0$  – равновесное состояние;  $K_{пер} 1,2$  – образование гомогенных кристаллов;  $K_{пер} 1,3$  – повышенное образование центров кристаллизации

Пересыщенные растворы неустойчивы, поскольку равновесие между молекулами сахарозы в растворе и образованными в нем кристаллами легко нарушается. Причем пересыщенное состояние сахарного раствора легко переходит в насыщенное вследствие процессов образования и роста в нем ее кристаллов. В насыщенном растворе кристаллы сахара не образуются и не растворяются. В метастабильном состоянии концентрация сахарного раствора может быть ниже, той при которой зародыши ЦК могут образовываться. Однако с течением времени возможно локальное спонтанное зародышеобразование, например, ввиду задержек с подкачками порций сиропа. Лабильное состояние раствора сахарозы соответствует тем концентрациям, при которых сразу начинают образовываться и формироваться кристаллы [27,31,105,113].

Процесс кристаллизации сахарозы из сахаросодержащего раствора, например, сиропа осуществляется в два этапа. На первом из них в пересыщенном сиропе образуют центры кристаллизации (ЦК) сахарозы, а на втором, после закрепления ЦК при подкачках сиропа с клеровкой, их начинают наращивать до требуемых размеров. Решающее значение имеет первая стадия, так как именно она предопределяет условия роста кристаллов сахарозы [2,3,7,51,177].

Формирование ЦК возможно если термодинамический потенциал сахарозы по завершению кристаллизации будет ниже, чем до ее начала [66].

Первоначальный этап кристаллизации сахарозы обусловлен образованием затравочных кристаллов. Необходимо отметить очень важный момент перехода молекул из растворенного состояния с высокой энергией в твердое состояние с более низкой энергией. При этом следует учитывать, что этот процесс сопровождается выделением скрытой теплоты [99]. Причем следует заметить то, что на сегодняшний день механизм формирования затравочных центров кристаллизации еще до конца не выявлен и обоснован. Вместе с тем, научно доказано, что формирование центров кристаллизации может протекать как гомогенным, так и гетерогенным путем. Сформированные в самом начале процесса кристаллизации в пересыщенном сахаросодержащем растворе зародыши сначала достигают «критических» размеров. То есть в самом начале затравочные кристаллы приобретают способность к дальнейшему росту за счет присоединения к ним молекул сахарозы из растворенного состояния [46]. Механизм кристаллообразования сахарозы в промышленных условиях является в основном гетерогенным, т.е. в сироп с клеровкой сахаров II и III продуктов вносят готовые ЦК, например, в виде сахарной пудры, кристаллической пасты, суспензии или маточного утфеля [8,66].

Процесс зарождения кристаллов имеет большое значение для сахарной промышленности, так как он наблюдается не только во время заводки кристаллов, но и на всем протяжении уваривания. Процесс зарождения кристаллов во многом предопределяет характер и развитие роста кристаллов [121].

Интенсификация образования ЦК требует проводить эту операцию при величине коэффициента пересыщения в диапазоне  $K_{\text{пер}}=1,25-1,3$ . В этот период жидкостная система (сиропа с клеровкой) в виду высокой степени пересыщения недостаточно стабильна и устойчива. Поэтому именно в этот период в нее вводят затравочные кристаллы, например, в виде сахарной пудры. После образования необходимого количества кристаллов их закрепляют на подкачках новых порций сиропа в аппарат. Для проведения оценки количества образовавшихся в утфеле кристаллов в процессе его уваривания аппаратчик непрерывно отбирает из него пробы. Так, для получения в утфеле 3000 шт кристаллов в 1 г необходимо обеспечить расстояние между центрами кристаллизации равное примерно 0,2 мм [103]. В производственных условиях с этой целью используют «пробное» стекло на 1 мм длины поверхности которого должно быть по 5-7 ЦК.

После образования и закрепления ЦК их начинают наращивать, постепенно снижая пересыщение в утфельной массе до величины  $K_{\text{пер}}=1,11-1,12$ . Это позволяет перевести утфель в метастабильное состояние, когда новые кристаллы не образуются, но начинается период их наращивания до сгущения увариваемого утфеля до требуемого содержания в нем СВ. Таким образом, после образования в утфеле необходимого количества ЦК следует строго соблюдать условия наращивания кристаллов, поддерживая в нем необходимое пересыщение.

В процессе кристаллизации движущей силой роста кристаллов является разность концентраций между содержащейся в пересыщенном растворе сахарозы и на границе раздела фаз [103]. Причем, данный фактор предопределяет скорость роста кристаллов. Также на кинетику роста кристаллов оказывает влияние коэффициент диффузии, температура утфельной массы, вязкость межкристального раствора и относительная скорость движения в нем кристалла [51,57,103,155,169,170].

Формирование ЦК, их последующее закрепление на подкачках сиропа, как и их дальнейший рост трудно отделимы друг от друга и требуют постоянного внимания со стороны операторов и сменных технологов [31,46,51,62]. Следует

особо отметить, что наращивание ЦК может осуществляться только после их «закрепления» и достижения необходимых размеров. Однако при нарушении технологии и колебаниях режима уваривания утфеля в вакуум-аппаратах возможен риск появления новых ЦК [63,121,122].

Процесс кристаллизации сахарозы как правило сопровождается включением в кристаллы различных несахаров [51,119]. Поэтому из сиропа предварительно должны быть максимально удалены различные примеси, особенно красящие вещества в процессе его подготовки к увариванию [31,36].

Изменение температуры кристаллизации регулируется в вакуум-аппарате разрежением. Важным условием проведения кристаллизации сахарозы является ее температурный режим. При этом температура кипения утфеля и поступающего на уваривание утфеля сиропа не должна быть более 80°C. При этих условиях уменьшаются потери сахарозы, особенно за счет термического разложения сахарозы [56,57,62,114].

Физические параметры системы уваривания утфеля, такие как пересыщение, вязкость, чистота, температура, способны оказывать влияние на скорость кристаллизации сахарозы, как и циркуляция его утфельной массы в вакуум-аппарате [123,167,171,172]. С целью интенсификации процесса уваривания утфеля на сахарных заводах стали использовать вакуум-аппараты, оснащенные перемешивающими устройствами [138].

При уваривании утфеля укрупнение кристаллов сахарозы может быть достигнуто с учетом процесса рекристаллизации сахарозы [66,121,148]. Она может быть результатом неравномерных подкачек сиропа, изменением температур и других факторов. Крупные кристаллы растут быстрее, чем мелкие, и могут увеличиваться за счет растворения мелких кристаллов и перераспределения сахарозы внутри раствора. При изменении температуры и концентрации межкристаллического раствора происходят многократные колебания, что может привести к укрупнению кристаллов или изменению структуры кристаллической решетки и габитуса кристаллов [57,154].

Механизм рекристаллизации сахарозы был исследован И.Г. Бажалом [4]. Он исходил из того, что рекристаллизация сахарозы протекает в условиях ограниченной растворимости веществ дисперсной фазы при периодических колебаниях температуры и концентраций раствора [10,11,66,123].

Следует также учитывать то, что уваривание утфеля представляет собой сложный тепловой процесс. Причем кристаллизация сахарозы протекает под разряжением одновременно с выпариванием из утфеля воды до состояния пересыщения межкристального раствора [108].

В ходе выпаривания из сахаросодержащего раствора, например, сиропа с клеровкой сахаров II и III продуктов, воды скорость этого процесса определяется разностью температур греющего пара и кипящей утфельной массы. В случае, если интенсивность процесса выпаривания воды из сиропа превышает скорость образования кристаллов, то возможен риск чрезмерного повышения в нем коэффициента пересыщения. Это в свою очередь может привести к образованию новых мелких кристаллов, т.е. «муки». Поэтому особую важность при уваривании утфеля представляет соблюдение равновесия между выпариванием воды из сиропа и ростом кристаллов сахарозы [49,51,66,113,121,139,147, 148].

### **1.3. Основные представления о процессе разделения утфеля I кристаллизации в поле действия центробежных сил**

Под центрифугированием в сахарной отрасли понимают процесс разделения утфеля на кристаллы сахара (твердая фаза) и межкристальный раствор (жидкая фаза). Его реализуют с использованием специальных машин – центрифуг, периодического или непрерывного действия [44,116,125,152,176].

Разделение утфеля I кристаллизации проводят в фильтрующих центрифугах периодического действия. При использовании данных центрифуг процесс разделения утфеля протекает в одной машине, но в разные периоды времени. Основной задачей разделения утфеля I кристаллизации в центрифугах является высокий выход кристаллов сахара требуемого качества при минимальных его потерях [23].

Отечественные центрифуги периодического действия для утфеля I кристаллизации оборудованы многоскоростным двигателем, обеспечивающим разгон ротора до установленной частоты его вращения (около  $1000 \text{ мин}^{-1}$ ). Циклограмма работы этих центрифуг состоит из нескольких последовательных операций: загрузка, разгон ротора с нарастанием частоты его вращения от 207–230 до  $500\text{--}700 \text{ мин}^{-1}$  и наконец до  $1000 \text{ мин}^{-1}$ , промывание с последующей подсушкой кристаллов при частоте вращения ротора около  $1000 \text{ мин}^{-1}$  и наконец торможение с выгрузкой кристаллов сахара из ротора при  $115 \text{ мин}^{-1}$  влажностью 0,5–1,5%. По своей сути операция «центрифугирование» включает в себя отделение от кристаллов первого (межкристального раствора) и второго оттека, образуемого при их промывании.

В соответствии с типовой технологией разгон загруженного ротора составляет 50–80 с, однако по представлениям Б.Н. Терешина этот процесс составляет 80–90 с [125].

При разделении в центробежном силовом поле утфель прижимается к ситовой поверхности ротора за счет центробежных сил, что может несколько ухудшить органолептические показатели качества кристаллов за счет частичного их разрушения. Поэтому чистота образуемого первого оттека за счет растворения в нем обломков кристаллов выше межкристального (однако не более 1%).

Отфильтрованный через образуемый при этом слой осадка кристаллов сахара первый оттек сначала попадает в закожужное пространство между кожухом и поверхностью ротора центрифуги, стекает вниз по внутренней поверхности кожуха и с помощью сегрегатора выводится из центрифуги в соответствующий сборник, как и второй оттек. Однако часть первого оттека полностью не удаляется с поверхности кристаллов и остается на них в виде пленки, что требует последующего ее удаления промывными агентами. Основной задачей промывания сахара является максимальное удаление с поверхности кристаллов пленки межкристального раствора (первого оттека) при условии их минимального растворения.

В соответствии с теориями центробежной фильтрации процесс разделения твердой и жидкой фаз утфеля в центрифугах периодического действия реализуется в два этапа. На первом этапе происходит отделение из утфеля межкристального раствора одновременно с формированием на фильтрующей поверхности ротора слоя кристаллов сахара. В ходе второго этапа имеет место освобождение порового пространства этого слоя от межкристального раствора. При этом сразу после отделения оттока начинается подсушка слоя осадка. Причиной этого является проникновение в поровое пространство слоя осадка воздуха.

Процесс разделения утфеля скоротечен и быстро завершается. Исследования показали, что длительность как первого, так и второго этапов незначительно отличается по времени и существенно зависит от гранулометрического состава кристаллов сахарозы. Эксперименты показали, что если при размере кристаллов сахара 0,7 мм общая продолжительность этих этапов составляла 23,3 с, то уже с возрастанием их размера до 0,8 мм она снижается до 17,9 с. В этой связи понятны допущения по первому этапу в рабочих моделях В.И. Соколова, Г.М. Знаменского, Б.Н. Терешина, Ю.Д. Кота, Е.В. Семенова, А.А. Славянского о том, что он протекает почти мгновенно (1–2 с). При этих условиях существенно упрощается моделирование и количественный анализ процесса разделения утфеля I кристаллизации [7,125].

Известно несколько рабочих моделей для описания процесса центрифугирования. При этом для удобства математического описания процесс центрифугирования представляют в виде отдельных взаимосвязанных операций. Причем их качественное содержание в различных моделях теории центробежной фильтрации несколько различается (табл. 5).

Таблица 5 - Сопоставление известных рабочих моделей теории центробежной фильтрации

Разработчики моделей	Периоды центрифугирования утфеля		
	Первый	Второй	Третий
Соколов В.И.	Образование осадка	Уплотнение осадка	Механическая сушка осадка
Знаменский Г.М.	Фильтрация с образованием осадка	Удаление межкристального раствора из осадка	Промывание кристаллов водой или паром
Жигалов М.С.	Фильтрация с образованием осадка	Начинается с попаданием воздуха в поры осадка	Промывание кристаллов водой
Терёшин Б.Н.	Образование слоя осадка (напорная фильтрация)	Вытекание межкристального раствора из слоя осадка (безнапорная фильтрация)	Стекание остатков межкристального раствора с поверхности кристаллов и их стыков
Кот Ю.Д.	Фильтрация через слой образовавшегося осадка	Освобождение пор осадка от остатков межкристального раствора и заполнение их воздухом	Стекание остатков межкристального раствора с поверхности кристаллов
Семёнов Е.В. Славянский А.А. Бержец А.И.	Напорная фильтрация (по Б.Н.Терешину)	Безнапорная фильтрация (по Б.Н.Терешину)	–

Г.М. Знаменский считал, что центрифугирование утфеля протекает в два этапа [48]. Первый из них представляет собой отделение твердой фазы с образованием слоя осадка и одновременной фильтрацией через него межкристального раствора. Этот этап протекает в короткий период времени, поэтому по мнению Г.М. Знаменского, им можно пренебречь. Второй этап его модели характеризуется удалением межкристального раствора из мест соприкосновения кристаллов. Удаление пленки с поверхности кристаллов по теории Г.М. Знаменского проводится за счет их промывания водой или с использованием для этой цели пропаривания.

В отличие от других моделей, рабочая модель С.Ф. Жигалова предусматривает проведение процесса промывания кристаллов сахара водой от пленки межкристального раствора в третьем периоде разделения утфеля на кристаллы сахара и межкристальный раствор [125]. Отличительной особенностью данной модели является так же то, что процесс

центрифугирования начинается практически в момент загрузки в ротор утфеля. Увеличение плотности упаковки кристаллов в слое осадка наблюдается в первую очередь у сита ротора, что обусловлено воздействием межкристального раствора, направленного к уже свободным от межкристального раствора порам. Под действием центробежных сил в направлении фильтрующей поверхности ротора происходит дополнительное уплотнение кристаллов. Причем при возрастании давления на внутреннем слое снижается пористость его осадка из кристаллов сахара.

Уплотнение осадка кристаллов завершается к окончанию процесса отделения межкристального раствора. Наиболее плотно при этом упакованы кристаллы на периферии вследствие распределения давления между их слоями. Сильное уплотнение и сжатие кристаллов ведет к их деформации с частичным обламыванием их граней. Кроме того, это также способствует уносу мелких кристаллов к периферии. Поэтому данное явление может понизить пористость массы кристаллов в наиболее сжатых слоях.

По теории Б.Н. Терешина [125] разделение протекает в три этапа. На первом из них формируется слой осадка одновременно с отделением межкристального раствора. Этот этап относят к напорной фильтрации, тогда как во втором периоде имеет место безнапорная фильтрация. В соответствии с представлениями В.И. Соколова формированию слоя осадка способствует период напорной фильтрации. Третий период завершается, когда удерживающие межкристальный раствор молекулярные силы уравниваются центробежной силой.

Основу центробежной модели Ю.Д. Кота составляют известные гидродинамические закономерности [55], при чем он считал, что центрифугирование утфеля состоит из трех взаимоувязанных периодов.

Теоретические представления Ю.Д. Кота в какой-то степени согласовываются с рабочей моделью Б.Н. Терешина. Для описания отделения межкристального раствора в первом периоде он использовал закон Пуазейля. Поэтому разработанное им математическое описание процесса существенно

отличается от других исследователей. По мнению Ю.Д. Кота слой осадка на стенке ротора представляет собой систему капилляров с диаметрами равными среднему значению размеров кристаллов сахара. По его мнению, размер капилляра находится в прямой зависимости от диаметра кристалла. Тогда как число капилляров на единицу площади фильтруемого материала обратно пропорционально квадрату диаметра кристалла.

В соответствии с моделью Ю.Д. Кота третий период центрифугирования представляет собой трехфазную систему при несжимаемости осадка. Именно в этом периоде устанавливается равновесие между силами поверхностного натяжения и центробежными силами. Также в этих условиях фильтрация межкристального раствора завершается и начинается подсушивание кристаллов сахара [55].

В модели центробежной фильтрации Е.В. Семенова, А.А. Славянского и А.И. Бержеца за основу принят поэтапный подход к описанию процесса центрифугирования [7]. При разработке своей модели ими было сделано допущение, что на ситовой поверхности при формировании осадка фильтрация межкристального раствора протекает практически мгновенно. Тогда как сам процесс центрифугирования соответствует рабочей модели Б.Н. Терешина. При этом они также, как и Ю.Д. Кот рассматривали осадок кристаллов как совокупность капилляров с радиусами эквивалентными радиусу пор, а утфель как несжимаемую невязкую жидкость. Причем процесс его разделения рассматривается или в подвижной цилиндрической системе, жёстко связанной с вращающимся ротором.

Процесс разделения утфеля I кристаллизации на твердую (кристаллы сахара) и жидкую фазы (межкристальный раствор) зависит от качества исходного сырья, технологии процесса уваривания утфеля, подготовки утфельной массы к ее разделению в центрифуге [125]. Эффективность центрифугирования утфеля возрастает в условиях правильного проведения процесса кристаллизации сахарозы в вакуум-аппарате, а также при его подготовке к этому процессу. Вместе с тем кристаллизация и центрифугирование, несмотря на свою взаимосвязь, могут

противоречить друг другу вследствие различия требований к гранулометрическому составу получаемого утфеля [31, 125].

Наличие в сахаре конгломератов ухудшает гранулометрический состав сахара. Образование конгломератов возможно, как на этапе зарождения центров кристаллизации сахарозы, так и в процессе их роста при нарушении режима уваривания утфеля или качества сахарной свеклы. Одной из причин повышенного содержания несахаров в сахаре является наличие в нем конгломератов [134].

Известно также, что несахара и красящие вещества, адсорбированные поверхностью кристаллов или попавших в них по причине окклюзии или инклюзии достаточно сложно удалить в процессе центрифугирования. Причем даже при использовании повышенного количества промывного агента практически не всегда удастся полностью удалить несахара. В этой связи важное место в технологическом процессе производства белого сахара касается мер по предотвращению образования конгломератов в сахаре в процессе уваривания утфеля [48].

С целью повышения эффективности технологии центрифугирования утфеля I кристаллизации было разработано устройство, позволяющее вести этот процесс по «гибкой» временной программе. Принцип ее действия заключается на фиксировании момента отделения межкристального раствора от кристаллов сахара. Его устанавливают по величине ударного воздействия межкристального раствора на чувствительный элемент, устанавливаемый между вращающимся ротором и кожухом центрифуги [125].

Работа по «гибкой» временной программе осуществляется в автоматическом режиме. Для этого в принципиальную схему электропривода центрифуги внесены некоторые изменения. При загрузке ротора центрифуги утфелем по мере набора им рабочих оборотов возрастает интенсивность отделения межкристального раствора. Совокупность капель отделяемого оттока воздействует на чувствительный элемент пневмосилового преобразователя,

который преобразует механическое воздействие отека в стандартный выходной сигнал в диапазоне 0,02–0,1 МПа для управления работой центрифуг.

В табл. 6 показано распределение продуктов при работе кристаллизационного отделения с центрифугированием утфеля I кристаллизации по «гибкой» временной программе и по типовому способу.

Таблица 6 – Результаты центрифугирования утфеля по I по «гибкой» и типовой программе (трехкристаллизационная схема)

Продукт, т	С использованием устройства	По типовому способу без использования устройства
Сироп	151,7	151,7
Утфель I	223,5	235,2
Сахар	102,6	101,1
Первый оттек утфеля I:	96,3	101,8
на уваривание утфеля I	25,7	31,7
на уваривание утфеля III	70,5	70,1
Второй оттек утфеля I:	24,6	32,2
на уваривание утфеля I	4,0	17,8
на уваривание утфеля III	20,6	14,6
Утфель II	46,3	46,1
Сахар II кристаллизации	18,1	18,0
Оттек II кристаллизации	28,2	28,1
Утфель III	98,7	98,2
Сахар III кристаллизации	48,1	48,8
Меласса	50,6	51,4

Из табл. 6 следует, что работа по «гибкой» временной программе позволила на 5,6 т в смену уменьшить массу первого и на 7,6 т второго отека утфеля I. При этом на 1,5 т в смену увеличилось по сравнению с работой без предложенного устройства выработка сахара стандартного качества, а продолжительность цикла центрифугирования сократилась в среднем на 12%.

Последующая модернизация устройства для отделения момента отделения межкристалльного раствора и начала промывки кристаллов позволила существенно улучшить его конструкцию. Устройство устанавливается на кожухе фильтрующей центрифуги в верхней его части и включает в себя чувствительный элемент, пружину, рычаг и выключатель [125].

При работе центрифуги с новым устройством отделяемый оттек воздействует на его чувствительный элемент – поршень, который под действием ударной силы оттека перемещается, сжимая пружину. По окончании отделения оттека пружина возвращает чувствительный элемент в исходное положение и через выключатель дает сигнал на промывку кристаллов сахара. К преимуществам усовершенствованного устройства можно отнести то, что оно не требует преобразования ударной силы отделяемого межкристалльного раствора в стандартный выходной сигнал для блока управления центрифугой и применения дорогостоящих приборов и элементов автоматики.

#### **1.4. Технологические схемы и способы кристаллизации сахара**

На большинстве сахарных заводов кристаллизацию сахарозы проводят в три последовательные ступени [103,162]. Схемы в основном рассчитаны на сырье среднего качества и позволяет вырабатывать стандартный сахар в соответствии с требованиями ГОСТ 33222-2015 при минимальных его потерях в мелассе.

Типовая трехкристаллизационная схема включает в себя следующие технологические операции [113,121,139]:

– Утфель I кристаллизации уваривают из сиропа с клеровкой и направляют на разделение в поле действия центробежных сил;

– Из полученных после центрифугирования первого и второго оттеков утфеля уваривают утфель II кристаллизации. Уваренный утфель центрифугируют в центробежном поле с получением сахара II продукта и двух оттеков (первого и второго);

– Уваривание утфеля III кристаллизации проводят с использованием первого оттека утфеля I кристаллизации для заводки в нем ЦК, а в конце уваривания – первого оттека утфеля II кристаллизации. В отличие от утфеля I и II кристаллизации, третью кристаллизацию дополнительно выдерживают в кристаллизационной установке постепенно охлаждая его до температуры 30–

35°С в течение 36–48 ч. Кристаллизация утфеля III охлаждением позволяет дополнительно повысить выход сахара.

В последней утфелемешалке кристаллизационной установки температуру утфеля повышают до 40–45°С. Нагревание утфеля проводят с целью снижения избыточного пересыщения межкристального раствора. Далее утфель разделяют в поле действия центробежных сил с получением мелассы.

Для того чтобы уменьшить избыточное пересыщение межкристаллического раствора в последней утфелемешалке кристаллизационной установки, утфель подвергается нагреванию до 40–45°С и направляют на центрифугирование с получением мелассы.

Трехкристаллизационная схема в такой реализации считается типовой. Она также может включать в себя различные варианты распределения оттеков и способов уваривания утфеля в зависимости от качественных показателей перерабатываемого сырья. В отличие от трехкристаллизационной, двухкристаллизационная схема проще, однако она имеет ряд недостатков. Так, она не позволяет получить сахар с высокими качественными показателями, а также обеспечить минимальные потери сахарозы в мелассе при существенных изменениях качества исходного сырья [49].

Помимо общих задач, например, кристаллизации сахарозы и истощения межкристального раствора, каждая из ступеней трехкристаллизационной схемы имеет определенные цели.

Основной целью первой ступени кристаллизации является производство кристаллического белого сахара, соответствующего требованиям ГОСТ 33222-2015. В свою очередь максимальное истощение межкристального раствора, а также получение «нормальной» мелассы является основной целью кристаллизации сахарозы на третьей ступени [105]. Вторая ступень выполняет роль промежуточной кристаллизации, содействующий первой или третьей ступеням кристаллизации в зависимости от исходного качества сырья.

Для организации работы продуктового отделения в оптимальном режиме необходимо соблюдение следующих принципов [120,123,155]:

– выдерживание снижения чистоты продуктов по технологической схеме и их правильное перераспределением по ступеням кристаллизации;

– уваривание утфеля I кристаллизации с использованием сиропа с низкой цветностью (не более 30 усл.ед) и чистотой 90–91,5%;

– при необходимости может производиться дополнительная очистка клеровок сахаров II и III кристаллизации, например, с использованием аффинации и на их основе [103,121];

– при ухудшении качества сырья вводить в технологию методы, способствующие ее улучшению (например, патентные разработки). Возможен последовательный ввод оттеков в вакуум-аппарат с понижением их чистоты в зависимости от этапа кристаллизации [49, 123];

– поддержание чистоты утфеля последней кристаллизации в диапазоне 76–78% для улучшения истощения межкристалльного раствора и повышения чистоты сахара III продукта [113,134,155].

При изменении качества поступающего на переработку сырья технологическая схема продуктового отделения должна быть гибкой и способной к перераспределению в ней продуктов кристаллизации [120].

Однако типовая кристаллизационная схема, кроме преимуществ может иметь и некоторые недостатки, к которым, например, следует отнести высокое суммарное количество утфелей, не всегда оправданную длительность циклов уваривания утфеля, особенно на третьей ступени кристаллизации. В следствии этих причин возможно повышение потерь сахарозы в результате ее термического разложения, достигающие 0,15%, а в некоторых случаях и более 0,5% к массе свёклы [31,105,155].

Эффективность промышленного проведения процесса кристаллизации сахарозы из пересыщенных сахарсодержащих растворов оценивается технологами по выходу кристаллического белого сахара и его качественным показателям, длительности цикла уваривания, расходу пара для обогрева оборудования и потерям сахарозы при термической деградации [103,139].

В значительной степени расход и качество поступающего на уваривание сиропа зависят от работы сокоочистительного и выпарного отделений завода [50,122,134]. Данные технологические параметры независимы, сложны в регулировании и требуют постоянного контроля заводской лабораторией. Особенно это касается температурных диапазонов греющего пара и его давления. Эти параметры в значительной степени зависят от работы ТЭЦ и распределения пара между основными паропотребителями сахарного завода [66].

### **1.5. Анализ технологий производства сахаросодержащих продуктов**

Отечественная сахарная промышленность отличается от других отраслей пищевой промышленности не только масштабами производства, но и весьма ограниченным ассортиментом готовой продукции. Расширение ассортимента сахарной промышленности при одновременном повышении ее качества – одно из стратегических направлений развития отрасли [77,95,110].

Технология производства сахара включает в себя максимальное извлечение сахарозы из клеток сахарной свеклы в виде сока, его очистку, сгущение и, наконец получение в виде кристаллов. Для перевода сахарозы из растворенного состояния в твердое кристаллическое сахаросодержащий раствор подвергают многократной очистке с использованием процесса фильтрации, сорбции, кристаллизации, в результате чего раствор утрачивает важные для здорового питания человека макро- и микронутриенты. Вместе с тем известны различные технологии производства сахаросодержащих продуктов с улучшенными технологическими свойствами.

К таким видам сахаросодержащей продукции с улучшенными технологическими свойствами можно отнести получаемые из сахара-сырца желтые и коричневые сахара. Благодаря наличию в их составе минеральных и органических соединений они имеют свойственный только им вкус и аромат. Отличительной технологической особенностью их получения является

отсутствие этапа их дополнительной очистки, при которой как правило сахар-сырец теряет значительную часть содержащихся в нем различных макро- и микронутриентов. Поэтому естественно, что желтые и коричневые сахара из тростникового сырца значительно дороже по сравнению с белым свекловичным сахаром (они выше по стоимости примерно в 3–4 раза) [78].

Также известны разработки по обогащению сахарозы питательными веществами из отходов сахарной свеклы [68]. Свекловичный сок имеет серовато-черную окраску и явно нетоварный вид, а также обладает специфическим не совсем приятным вкусом и запахом. Это является существенным препятствием его использования без соответствующей очистки.

Вместе с тем, сахар, как углевод, является одним из необходимых для организма человека продуктом питания. Он относится к социальным продуктам массового потребления и сравнительно невысокой стоимости. Его можно использовать в качестве пищевой основы в виде различных пищевых добавок, как например, витаминов, микроэлементов, экстрактов, а также пектиновых веществ [104].

Новые виды сахаросодержащих продуктов могут быть получены путем введения в них различных пищевых ингредиентов, в том числе с последующим их прессованием в виде различных конфигураций [6] или сокристаллизацией сахарозы с различными пищевыми компонентами для повышения ее пищевой ценности [148, 163, 165, 173, 174, 182, 183, 184, 186, 187, 196, 197, 198]. Недостатками подобных технологий является неравномерность смешивания пищевых добавок с кристаллическим белым сахаром, а также недостаточная однородность их гранулометрического состава. Эти показатели существенно снижают технологические свойства сахаросодержащих продуктов поскольку им свойственны невысокие органолептические показатели качества.

Одним из способов повышения технологических свойств сахара является его производство в виде, например, гранул с улучшением их структурных свойств. Такой подход наиболее экономичен и прост в реализации. Впервые технология производства гранулированного сахара была разработана НИИ

крахмалопродуктов и МГУТУ им. К.Г. Разумовского. Эта технология основана на технологии получения сахарозы в виде гранул, размером 3–6 мм. Она включает в себя подготовку затравки для их получения, наращивания в режиме непрерывного перемешивания и последующую сушку готового гранулированного продукта путем обдувания его горячим воздухом. При этом рост гранул происходит за счет испарения воды с их поверхности в ходе кристаллизации сахарозы. Реализацию способа проводят в специально созданном с этой целью грануляторе, где на затравочные гранулы наносят концентрированный сахаросодержащий раствор способный к кристаллизации сахарозы [79]. Причем в качестве затравки можно использовать кристаллический белый сахар.

Такая технология позволяет получить сухой сыпучий гранулированный продукт в течение довольно короткого периода времени. Дальнейшее развитие этого направления позволило разработать технологию производства гранулированного сахаросодержащего продукта с использованием плодового экстракта. В отличие от ранее созданной технологии гранулирования, усовершенствованная технология позволяет наращивать гранулы на концентрированном экстракте шиповника [80].

Гранулированные сахаросодержащие продукты могут быть использованы в пищевой промышленности в виде декоративных добавок к кондитерским изделиям. Кроме того, их можно использовать как сырье для обогащения различных пищевых продуктов.

К новым видам подобной сахаросодержащей продукции предъявляются достаточно высокие требования. В частности, они должны длительное время сохранять структурную целостность внесенных в их структуру добавок. Для обеспечения их пищевой ценности вводимые в гранулы добавки должны быть защищены от влияния внешних воздействий окружающей среды. При этом необходимо поддерживать структурную целостность добавляемых компонентов, при необходимости маскировать их вкус, повышать растворимость в воде, как и усвояемость. Поэтому потенциал технологических особенностей

гранулированных сахаросодержащих продуктов еще требует дальнейшего развития.

## **1.6. Формулирование цели и задач проведения теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации**

При анализе литературных источников было выявлено, что в настоящее время существует ряд нерешенных проблем в теории и практике получения кристаллического белого сахара. Такая ситуация показывает на необходимость более глубоких исследований в области сахарного производства. Особого внимания заслуживает направление на улучшение технологических свойств сахаросодержащей продукции. Данные вопросы остаются открытыми и требуют дальнейшего изучения.

Наиболее наукоемким этапом производства белого сахара, требующего постоянного углубления и совершенствования является кристаллизация сахарозы. Этот процесс в производственных условиях реализуют из пересыщенных сахаросодержащих растворов под разряжением в диапазоне температур около  $76^{\circ}\text{C}$  в рабочем объеме вакуум-аппарата. Сложность его осуществления обусловлена не только изменением качества перерабатываемого сырья, но также технологическими и техническими возможностями его реализации [139,155]. В настоящее время отсутствует в полной мере обоснованный единый научный подход, позволяющий его осуществлять в оптимальных условиях производственного цикла, что требует дальнейших более глубоких исследований для научного обоснования и принятия более эффективных решений для его реализации.

Кристаллизация сахарозы в продуктовом отделении сахарного завода представляет собой один из важнейших технологических этапов в производственном цикле получения кристаллического белого сахара. Поэтому особую важность представляет возможность его математического моделирования для реальных производственных условий. Причем в этом направлении уже проделана большая работа [63,134], разработан ряд

математических моделей, учитывающих максимальное количество физических и технологических параметров. Однако до конца еще не раскрыта сущность влияния теплоты кристаллообразования на кинетику роста кристаллов сахарозы из пересыщенных производственных растворов.

Кроме того, еще имеется существенное различие, требующее обоснования, между зарождением центров кристаллизации и их последующим ростом [31,57]. В частности, стоит отметить, что процесс зародышеобразования существенно влияет на кинетику их роста и однородность растущих кристаллов. В связи с этим, большое практическое значение имеет не только условия формирования ЦК, но и установление их необходимого количества в пересыщенном растворе. При этом важно не только правильно подобрать начальные условия закладки ЦК, но и воздействовать и управлять их получением.

Несмотря на наличие различных способов уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации, важнейшим условием совершенствования технологии производства кристаллического белого сахара является именно комплексный подход к распределению основных технологических операций продуктового отделения при учете возможности переработки сырья с различной сахаристостью. Поэтому исследования в этом направлении имеют большое практическое значение, в том числе в решении вопросов повышения выхода кристаллического белого сахара и его качества.

Кристаллический белый сахар является одним из наиболее востребованных продуктов повседневного спроса. Его используют как в пищевых, так и в технологических целях, однако ассортимент сахарсодержащей продукции отечественных сахарных предприятий невелик [95]. Учитывая тот факт, что белый сахар входит в группу продуктов питания высокого социального значения, сегодня как никогда актуально направление на создание новых видов сахарсодержащих продуктов с улучшением их технологических свойств. Причем при создании новых видов сахарсодержащих продуктов особую важность представляет не только расширение ассортимента продукции, но и разработка соответствующих технологических подходов. В частности,

например, способствующих повышению сохранности новых видов сахаросодержащей продукции.

На основе результатов анализа известных теоретических исследований и практических решений по повышению эффективности процесса промышленной кристаллизации сахарозы, целью настоящего исследования явилось усовершенствование именно технологии уваривания утфеля I кристаллизации. Решение проблемы с образованием и условиями правильного наращивания кристаллов по своей сути является обеспечением высокого выхода и сахарозы.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

- Выполнить обзор и критический анализ качественных показателей белого сахара отечественных свеклосахарных предприятий;
- Усовершенствовать физико-математическую модель зарождения центров кристаллизации сахарозы в пересыщенных производственных растворах с учетом влияния теплоты кристаллообразования на процесс уваривания утфеля I кристаллизации;
- Обосновать научную значимость и условия фракционирования для повышения степени однородности центров кристаллизации на основе их сепарирования до заданной области размерных значений;
- Научно обосновать, разработать, и защитить патентами РФ новые разработки в области уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации;
- Разработать комплексную технологию на базе основных операций процесса уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации при переработке сырья различной сахаристости для повышения выхода белого сахара;
- Обосновать и разработать технологические режимы повышения технологических свойств белого сахара;
- Исследовать технологические свойства гранулированного сахаросодержащего продукта.

## ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА САХАРА БЕЛОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО

Приоритетным направлением развития государственной политики Российской Федерации в сфере питания является не только повышение качества пищевой продукции, но и ее безопасности. В этом направлении уже накоплен большой производственный опыт. Однако решение этой проблемы во многом определяется состоянием законодательной и методической базы в области качества и безопасности продуктов питания.

За последнее десятилетие нормативная документация сахарной отрасли претерпела ряд изменений. Обновлены стандарты на сырье, основную и побочную продукцию, а также на терминологию, методы определения основных качественных показателей, правила приемки и методы отбора проб. Основным документом, регламентирующим качество сахара в настоящее время является ГОСТ 33222-2015 [23]. В соответствии с этим отечественным стандартом сахарные заводы должны выпускать сахар белый четырех категорий: Экстра, ТС1, ТС2, ТС3, а также сахар кусковой и сахарную пудру. Категоризация кристаллического сахара осуществляется по физико-химическим показателям (массовая доля сахарозы по прямой поляризации, массовая доля влаги, массовая доля редуцирующих веществ, массовая доля золы, цветность в растворе) [37]. То есть, по сути, в последнем стандарте на законодательном уровне установлены минимальные обязательные требования к качеству сахара. При этом предусмотрена возможность вариации уже установленных качественных показателей для приобретения конкурентных преимуществ отдельными фирмами и т. д.

Ежегодно увеличивается доля поступающего в промышленную переработку сахара. Однако в связи со специфичностью технологических процессов промышленные потребители сахара предъявляют более высокие требования к регламентируемым показателям качества и безопасности сахара. Причем они также могут уточнить имеющиеся или разработать свои требования к качеству сахара, например, при его использовании для технических целей. К

перечню значимых для производителей показателей качества сахара относят: мутность раствора, содержание взвешенных частиц, содержание солей кальция, рН сахара, содержание сапонины, наличие крахмала, скорость растворения кристаллов, средний размер кристаллов, способность к флокулообразованию при подкислении и др. [150,194].

## 2.1. Теоретические и экспериментальные аспекты исследования качества сахара

Схема проведения исследования представлена на рис. 2.

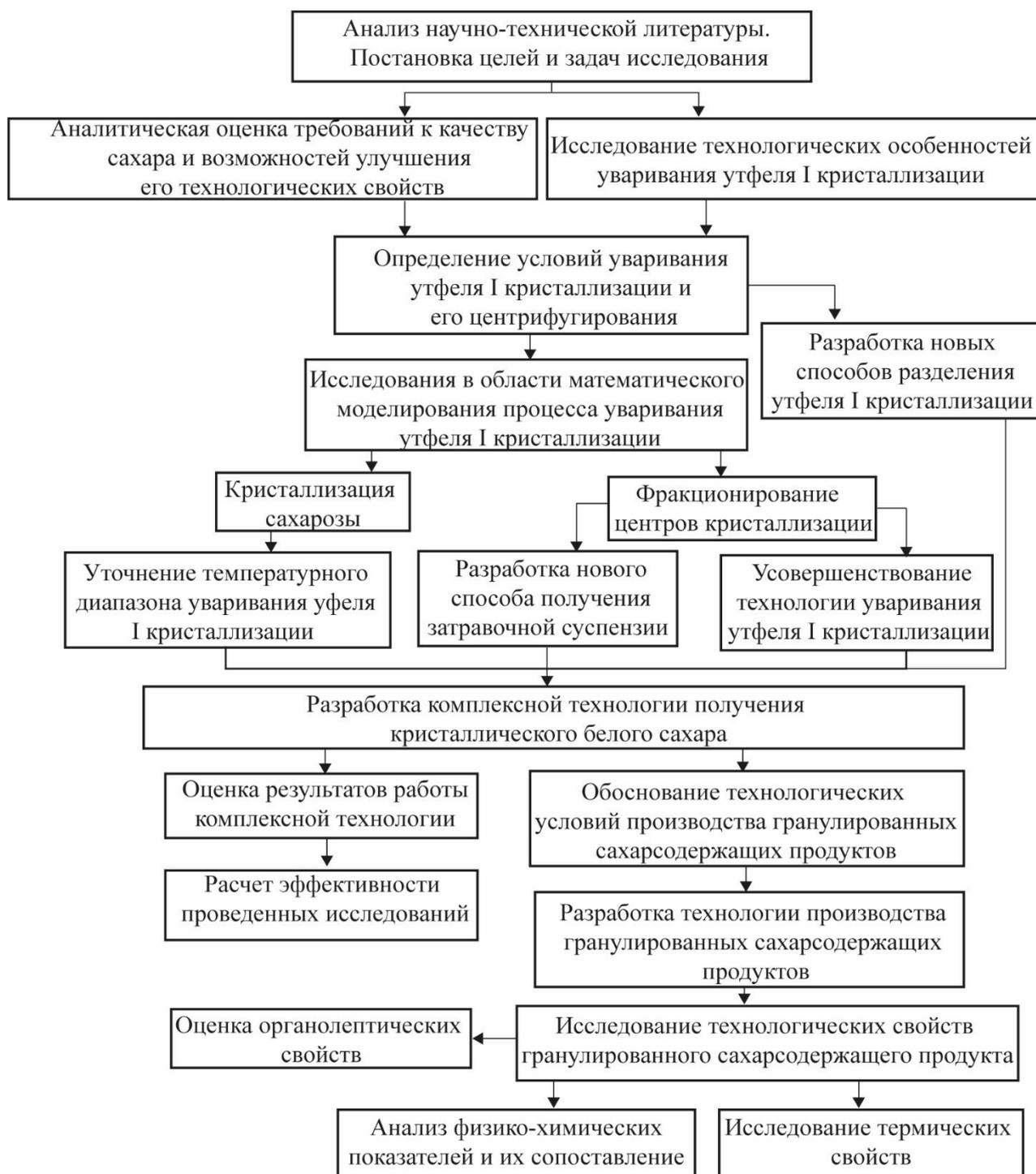


Рисунок 2 - Схема исследований по диссертационной работе

Схема исследования по диссертационной работе состоит из ряда последовательных этапов, включающих в себя проведение аналитической оценки предъявляемых к качеству сахара требований и направлений улучшения его технологических свойств, определение условий уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации, математическое моделирование процесса кристаллизации сахарозы и фракционирования ее центров кристаллизации, применение результатов моделирования в разработке усовершенствованных способов уваривания утфеля I кристаллизации и создание на их основе комплексной технологии получения кристаллического белого сахара. Кроме того, исследование включает в себя проведение оценки эффективности работы комплексной технологии и создание технологии производства гранулированных сахаросодержащих продуктов с дальнейшим исследованием технологических свойств готовой продукции.

## **2.2. Методы исследования и их основное содержание**

В качестве объектов экспериментальных исследований были выбраны образцы сахара следующих отечественных сахарных заводов: ООО «Красноярский сахарник»; ООО «Залегощенский сахарник»; ОАО «Лискисахар»; ОАО Сахарный завод «Ленинградский»; АО «Кшенский сахарный комбинат»; ОАО «Лебедянский сахарный завод»; ООО Олымский сахарный завод; ООО «Теткинский сахарный завод»; ООО «Павловский сахарный завод»; ООО «Сотницынский сахарный завод»; ООО «Ливны Сахар»; ОАО «Чишминский сахарный завод».

Органолептические, физико-химические и микробиологические показатели качества сахара определяли по рекомендуемым в ГОСТ 33222-2015. «Сахар белый. Технические условия» [23] методикам [14, 15,16,17,18,19,20,21,22,24,25,26] (рис. 3).

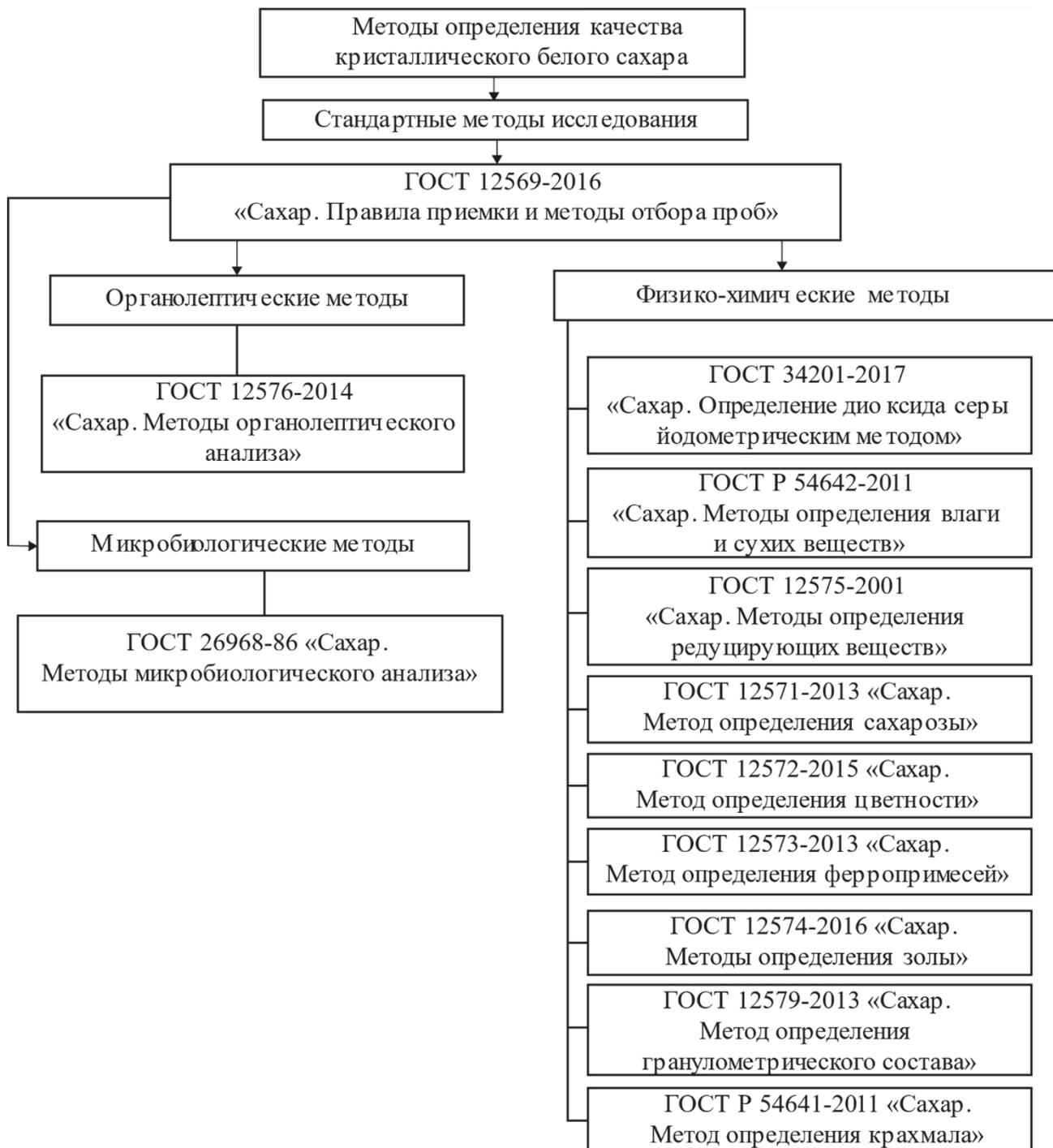


Рисунок 3 - Стандартные методы исследования качества кристаллического белого сахара

### 2.3. Специальные методы исследования

Перечень специальных методов исследования представлен на рис. 4.

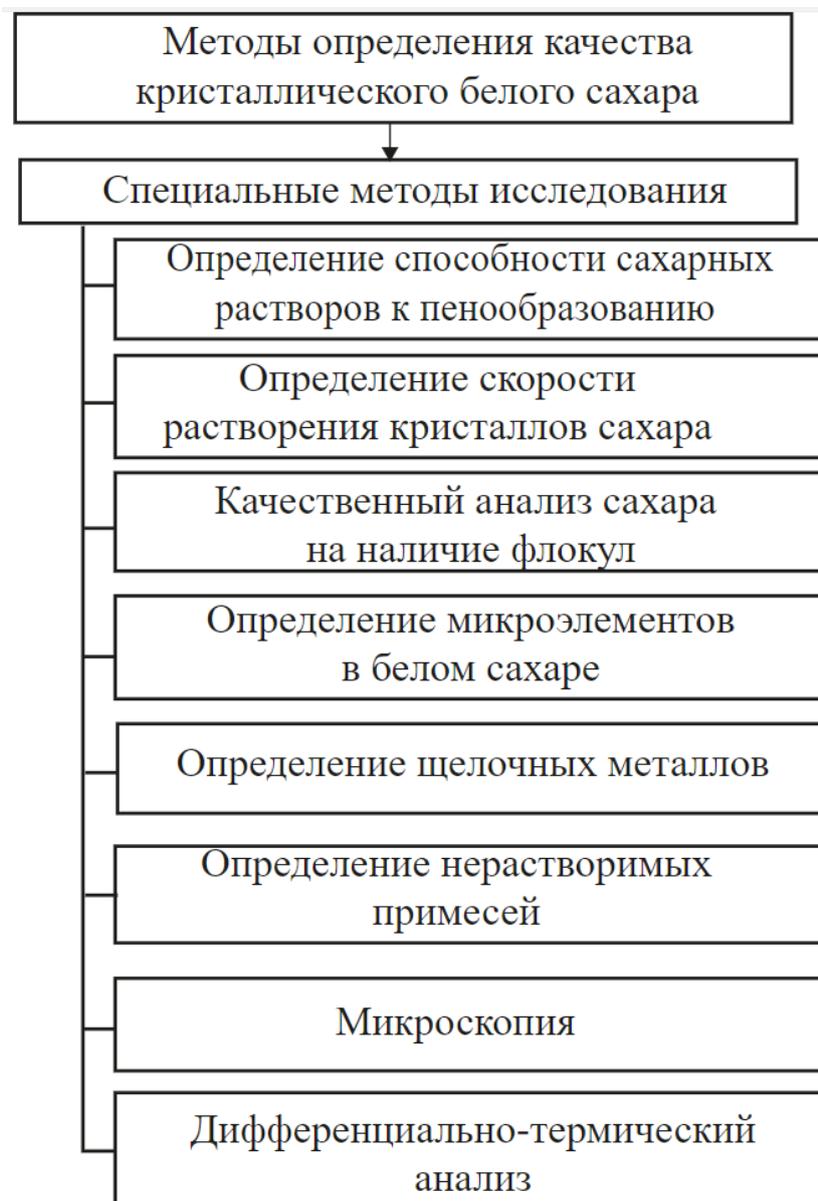


Рисунок 4 - Специальные методы исследования

### *Способность сахарных растворов к пенообразованию*

Методы определения пенообразующей способности сахарных растворов основаны на имитации условий, приводящих к пенообразованию [159]. Они достигаются за счет доведения сахарного раствора до интенсивного кипения. Этот метод основан на измерении высоты пены, образующейся на поверхности сахарного раствора, содержащего 80% сухих веществ, спустя 2-3 минуты после начала интенсивного кипения (рис.5).

Методика выполнения опыта осуществлялась следующим образом: в термостойкий стакан вместимостью 150–200 мл наливают 20 мл дистиллированной воды температурой 20–25°C и добавляют 80 г кристаллического белого сахара. Затем термостойкий стакан помещают на электроплитку с асбестовой сеткой и нагревают до кипения в течение 10 минут. Максимальное значение высоты пены достигается в течение первых 2–3 мин после закипания, поэтому именно в этот период времени проводят ее измерение.

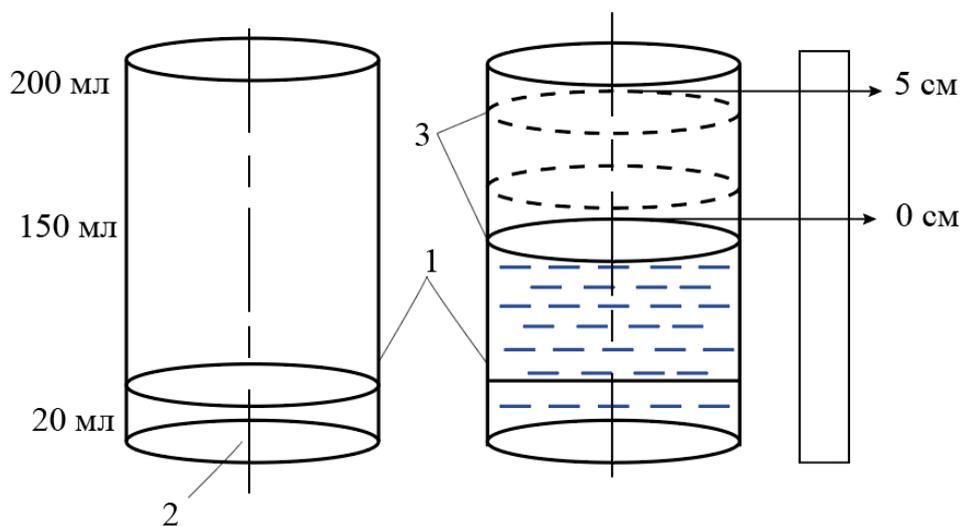


Рисунок 5 – Схема установки для определения пенообразующей способности сахарных растворов: 1–лабораторный стакан; 2–сахар; 3–слой пены

### *Определение скорости растворения кристаллов сахара*

Для определения скорости растворения кристаллов была использована известная методика [158]. Данная методика основана на наблюдении образуемых при растворении сахара концентрационных потоков. Для определения скорости растворения кристаллов в стеклянный стакан наливают дистиллированную воду комнатной температуры. При этом стакан заполняют, не доходя до верхнего края стакана примерно 20–30 мм. Исследуемый сахар (5 г) помещают в специальный конусообразный сетчатый контейнер с ячейками  $0,15 \times 0,15$  мм и опускают в стакан, не доходя до его дна на 110–120 мм (рис.6), причем сразу после погружения образца включают секундомер. Растворение кристаллов завершается в момент прекращения испускания концентрационных потоков. Для определения среднего времени растворения кристаллов данную методику проводят 2–3 раза [157].

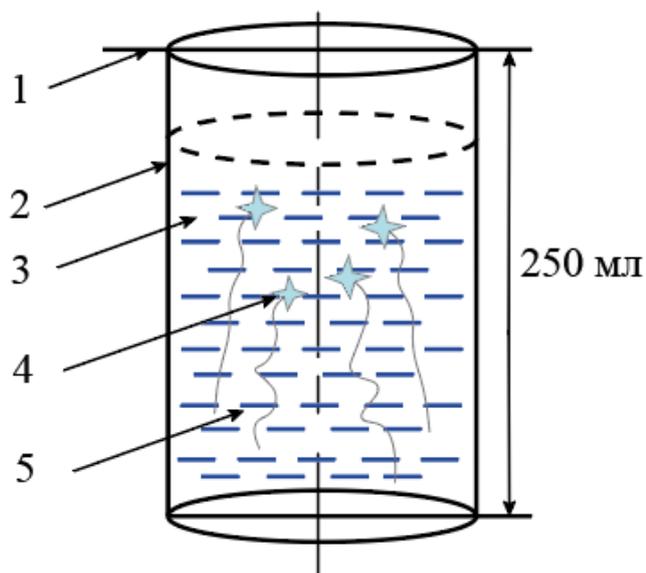


Рисунок 6 – Схема установки для определения скорости растворения сахара: 1–держатель; 2–стакан; 3–сетчатый контейнер; 4–испытуемый образец сахара; 5–концентрационные потоки при растворении сахара

### *Качественный анализ сахара на наличие флокул*

Данная методика может быть применена как для свекловичного сахара, так и тростникового [39].

Качественный анализ осуществляется следующим образом: в 500 см<sup>3</sup> дистиллированной воды растворяют 600 г сахара и к полученному раствору добавляют при перемешивании 2,7 см<sup>3</sup> фосфорной кислоты доводя рН раствора до 1,5. Раствор приливают в цилиндр и помещают в подходящее место. При этом цилиндр должен находиться в неподвижном состоянии в течение 10 дней при комнатной температуре. Затем при интенсивном освещении фиксируют наличие флокул.

Полученные результаты объединяют в группы по следующим критериями:

отрицательный – отсутствие флокул видимых при интенсивном свете;

средний – легкие флокулы визуально наблюдаемые при интенсивном свете;

высокий – флокулы, которые можно наблюдать, не используя интенсивного света.

### *Определение микроэлементов в белом сахаре*

Определение микроэлементов в кристаллическом белом сахаре базируется на атомно-абсорбционном анализе [28,117,164,181,185,192,195]. Методика проведения этого анализа осуществляется следующим образом: первоначально анализируемый сахаросодержащий раствор вносят в пламя воздушно-ацетиленовой смеси. Далее через него пропускают пучок света с заданной длиной волны и при ее совпадении с резонансным переходом атома из его нормального состояния в возбужденное, наблюдается частичное поглощение света. Данное явление фиксируют с помощью фотоумножителя. Интенсивность пучка света пропорциональна числу атомов определяемого элемента в сахаросодержащем растворе. Для построения градуировочного графика этой зависимости используют приготовленные из соответствующих чистых металлов

(более 99,9%) стандартные растворы, а содержание элементов в растворе определяют по формуле

$$X = \frac{C \cdot K}{P},$$

где X - содержание металла в пробе, мг/кг;

C - концентрация, определяемая по градуировочному графику, мкг;

K - коэффициент разбавления;

P - масса пробы, г или в пересчете на сухие вещества пробы

$$P_{ист} = \frac{P \cdot СВ}{100},$$

где СВ - сухие вещества пробы, %;

$P_{ист}$  - масса пробы в пересчете на ее сухое вещество, г; массовое содержание пробы в пересчете на массу сухого вещества, г

$X / P_{ист}$  – массовое содержание микроэлемента в СВ образца, %.

#### *Определение содержания щелочных металлов*

Для определения содержания щелочных металлов был использован эмиссионный метод. Исследования проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре ААС-I-N фирмы «Карл Цейсс Иена» [179]. Значение концентрации анализируемых элементов, вводимых в пламя, фиксировали на основе их излучения, причем первичный источник резонансного излучения был отключен.

#### *Определение нерастворимых примесей*

Для определения нерастворимых примесей была использована методика подсчета частиц с помощью электронного анализатора ФС-112/3 [105,118]. Данный анализ базируется на фотометрическом методе дифференцированного счета частиц определенного фракционного состава. Через анализируемый сахаросодержащий раствор рассеивают импульсы света с амплитудой пропорциональной размерам частиц. Причем рассеивание света проводят в ходе

переноса взвешенных частиц сахаросодержащего раствора через проточную кювету анализатора при пересечении освещенной счетной зоны.

Для проведения анализа кристаллы сахарозы предварительно растворяют в дистиллированной воде. Содержание сухих веществ в растворе должно составлять 10%, причем значение водородного показателя (рН) регулируют путем добавления щелочи или кислоты до 7 при температуре раствора 20°C. Для анализа используют 25 г исследуемого образца и пропускают через кювету прибора. Количество нерастворимых частиц отображается на экране прибора, что позволяет рассчитать их количество и размер [63].

Число нерастворимых частиц (N) вычисляют на 10 г сахара по формуле

$$N = (n_1 - n_2) \times 4,$$

где  $n_1$ ,  $n_2$  – число нерастворимых частиц, соответственно в растворе сахара и растворителе (воде), шт.;

4 – коэффициент пересчета на 10 г сахара.

### *Микроскопия*

Микрофотографии позволяют оценить фактуру поверхности, цвет и форму исследуемых образцов [127].

Образцы кристаллического белого сахара (ТС2) и гранулированного сахаросодержащего продукта исследовали с использованием микроскопа Микромед МС-5-Zoom LED под 5-кратным увеличением с видеоокуляром TourCam 16.0 MP.

### *Дифференциально-термический анализ*

В ходе исследования, с целью уточнения качественных характеристик сахара и сахаросодержащего продукта был использован дифференциально-термический анализ (ДТА). Данный метод нашел широкое применение в различных прикладных и фундаментальных исследованиях в связи его с простотой, быстротой, многопрофильностью и высокой точностью. Метод ДТА базируется на фиксировании разницы температур исследуемой пробы и

контрольного образца (эталон) в условиях программированного варьирования температуры среды. В результате изменения температуры в исследуемой пробе могут протекать процессы, связанные с трансформацией состояния термодинамической системы образца – плавление, дегидратация, диссоциация, реорганизация кристаллической структуры, испарение, окислительно-восстановительные реакции [175].

Все изменения состояния термодинамической системы сопровождаются эндотермическими или экзотермическими процессами, что выражается в различии температуры исследуемой пробы и контрольного образца. ДТА фиксирует динамику изменения массы исследуемого продукта в зависимости от температуры, что позволяет проанализировать термоустойчивость и состав продукта.

Экспериментальные исследования проводились на приборе (ТГ-ДТА/ДСК) модели STA 449 F3 Jupiter синхронного термического анализа комплексного исследования в различных газовых атмосферах методами дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ).

Данный прибор комбинирует в себе преимущества высокочувствительных термовесов и дифференциального сканирующего калориметра (рис.7).

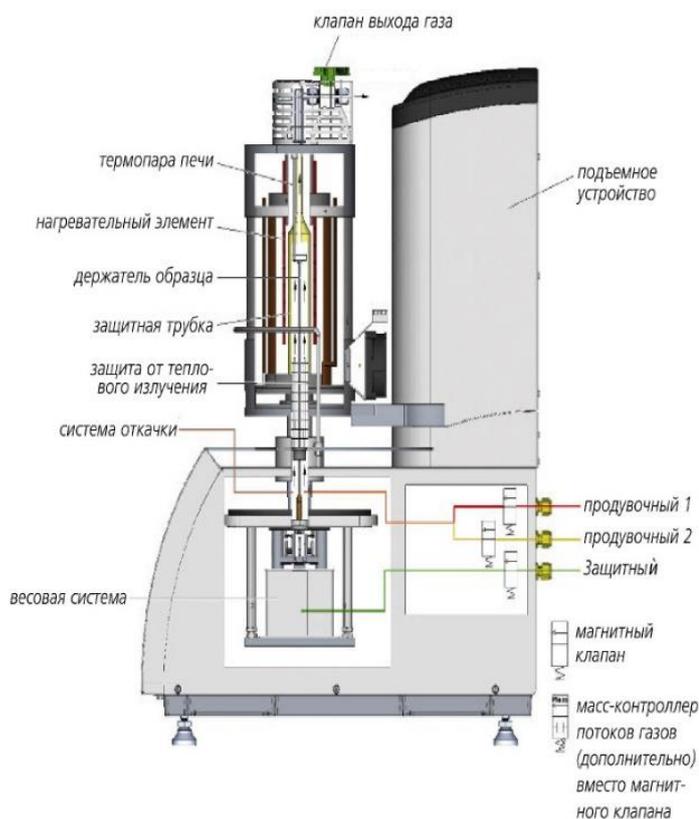


Рисунок 7 – Устройство прибора для дифференциально-термического анализа STA-449 F3 Jupiter

Результатом термического анализа являются термические кривые – термограммы (кривые нагревания), которые зависят главным образом от химического состава и структуры исследуемого вещества.

При исследовании использовались навески кристаллического белого сахара с влажностью 0,1% и гранулированного сахаросодержащего продукта, полученного по Пат. № 2774428 [92].

В табл. 7 и 8 представлены условия исследования и температурная программа испытаний.

Таблица 7 – Условия исследования

Тип термопары	S
Тигель, материал	Алюминий
Атмосфера	Азот
Расход продувочного газа, мл/мин	20 мл/мин

Таблица 8 – Температурная программа исследования

Тип	Начальная температура, °С	Конечная температура, °С	Скорость, К/мин
Нагрев	25	220	5

Для обработки полученных зависимостей кривых ДСК и ТГ использовалось программное обеспечение NETZSCH Proteus и MS Excel, после чего строились дифференциальные кривые dДСК и dТГ. Эксперименты проводились по программе нагрева от 20 до 300°С со скоростью 5 К/мин в окисленных алюминиевых тиглях в среде газообразного азота класса 5 с расходом продувочного газа – 60 мл/мин.

#### **2.4. Качество сахара и его соответствие требованиям стандартов**

Уровень обеспечения потребности населения России в сахаре определяется объёмом производства и ассортимента продукции сахарной промышленности [96,100,115,133].

Для проведения оценки качества и установления соответствия требованиям ГОСТ 33222-2015 отечественного белого сахара были отобраны образцы 13 сахарных заводов (табл. 9). При этом 6 образцов были подвергнуты более углубленному анализу.

В ходе экспериментов оценивали органолептические, физико-химические, микробиологические показатели качества сахара. Дополнительно проводился анализ сахарных растворов, полученных из исследованных образцов. В частности, проведены опыты по определению скорости растворения кристаллов сахара и уточнена пенообразующая способность сахарных растворов. Установлено наличие в растворах крахмала, величина их мутности и содержание солей кальция. Дополнительно проведены анализы на наличие флоккул, величину рН, буферность, общее содержание SO<sub>2</sub> (табл. 11), а также исследован элементарный состав компонентов золы (табл. 12).

Повышенное внимание было уделено углубленному анализу гранулометрического состава кристаллического белого сахара (табл. 12).

Данные по оценке органолептических показателей кристаллического белого сахара показали, что в целом исследуемые образцы соответствуют требованиям ГОСТ 12576-2014.

Результаты анализа физико-химических показателей, исследуемых образцов сахара представлены в табл. 9.

Таблица 9 – Физико-химические показатели качества белого сахара

№ п/п	Сахарные заводы	Показатели качества				
		Массовая доля сахарозы по прямой поляризации	Массовая доля редуцирующих веществ (в пересчете на сухое вещество)	Массовая доля золы (в пересчете на сухое вещество)	Цветность	Массовая доля влаги
Норма по ГОСТ 33222-2015						
1	Белый сахар (категория ТС2)	не менее 99,70%	не более 0,04%	не более 0,036%	не более 104,0 ед. опт. пл. ICUMSA	не более 0,10%
Сахарные заводы						
1	ООО «Красноярский сахарник»	99,71	0,01	0,037	106,0	0,06
2	ООО «Залегощенский сахарник»	99,75	0,01	0,008	66,0	0,05
3	ОАО «Лискисахар»	99,68	0,05	0,016	65,0	0,03
4	ОАО Сахарный завод «Ленинградский»	99,76	0,01	0,010	101,0	0,01
5	АО «Кшенский сахарный комбинат»	99,77	0,01	0,009	89,0	0,02
6	ОАО «Лебедянский сахарный завод»	99,87	0,01	0,009	70,0	0,08
7	ООО Олымский сахарный завод	99,79	0,01	0,010	63,0	0,02
8	ООО «Теткинский сахарный завод»	99,78	0,03	0,009	99,0	0,11
9	ООО «Павловский сахарный завод»	99,79	0,01	0,012	68,0	0,03
11	ООО «Сотницынский сахарный завод»	99,89	0,01	0,012	45,0	0,02
12	ООО «Ливны Сахар»	99,75	0,01	0,012	40,0	0,07
13	ОАО «Чишминский сахарный завод»	99,73	0,02	0,015	69,0	0,03

Исходя из данных табл. 9 можно заключить, что содержание сахарозы в анализируемых образцах варьировалось в диапазоне от 99,68% до 99,89%, что, в целом, соответствует требованиям стандарта.

Цветность рассматриваемых образцов изменялась от 40,0 до 106,0 ед.опт.пл. (ICUMSA).

Повышенное содержание редуцирующих веществ обнаружено в образце сахара ОАО «Лискисахар» (0,03%), ООО «Теткинский сахарный завод» (0,03%) и ОАО «Чишминский сахарный завод» (0,02%).

В сахаре ООО «Залегощенский сахарник» обнаружено наименьшее содержание золы (0,008% в пересчете на сухое вещество), а наибольшее содержание золы отмечено в образцах сахара ООО «Павловский сахарный завод» и ООО «Сотницынский сахарный завод».

Установлены значительные колебания по содержанию влаги исследуемых образцов (от 0,01 до 0,04%). Полученные данные подтверждают актуальность дальнейших исследований в области разработки усовершенствованных способов сушки сахара [40,41,52].

Влажность сахара не только определяет физическое состояние продукта, но также влияет на интенсивность протекания в нем возможных химических и микробиологических изменений в процессе хранения [5,76,199]. В средах с повышенной влажностью возрастает риск заражения кристаллов сахара микроорганизмами [97,169,193].

Результаты экспериментальных исследований по определению микробиологических показателей представлены в табл. 10.

Таблица 10 – Микробиологические показатели белого сахара ряда отечественных сахарных заводов

Сахарный завод	Число микроорганизмов в 10 г сахара			
	<i>бактерии</i>	<i>плесневые грибы</i>	<i>дрожжи</i>	<i>общее число</i>
ООО «Краснояржский сахарник»	2052	184	250	2486
ОАО «Лебедянский сахарный завод»	1425	155	200	1780
ОАО «Чишминский сахарный завод»	1933	158	150	2241
ООО «Ливны Сахар»	1561	161	150	1872
ООО «Теткинский сахарный завод»	1854	170	200	2224
ООО «Залегощенский сахарник»	1424	126	200	1750

Из табл. 10 видно, что в образцах сахара предприятия ООО «Краснояржский сахарник» отмечено наибольшее содержание микроорганизмов – 2486 шт. в 10 г сахара.

К качественным показателям сахара, имеющих важное значение, кроме установленных ГОСТ 33222-2015, относятся: мутность раствора, содержание взвешенных частиц, содержание солей кальция, рН сахара, содержание сапонина, наличие крахмала, скорость растворения кристаллов, средний размер кристаллов, способность к флокулообразованию при подкислении.

В табл. 11 приведены результаты углубленной оценки кристаллического белого сахара некоторых отечественных сахарных заводов.

Таблица 11 – Дополнительные показатели качества сахара

Показатели качества	Сахарные заводы					
	ООО «Краснояр- ужский сахарник»	ОАО «Лебедянский сахарный завод»	ОАО «Чимминский сахарный завод»	ООО «Ливны Сахар»	ООО «Теткинский сахарный завод»	ООО «Залегощенский сахарник»
Высота пены, см	2,3	2,5	1,2	1,6	1,7	2,9
Время растворения кристаллов сахара, с	500	495	470	480	460	440
Содержание крахмала, мг/кг	отсутствует	41,68	47,46	61,68	62,03	отсутствует
Критерий наличия флоккул	высокий	отрицательный	средний	средний	средний	средний
Мутность сахарных растворов, ед. ICUMSA	19,0	17,2	18,3	20,1	4,26	11,6
Содержание двуокиси серы, мг/кг	1,1	1,8	2,9	2,5	1,1	1,6
Содержание солей кальция, % СаО	0,010	0,014	0,015	0,016	0,015	0,007
рН	7,0	7,1	7,0	6,6	6,9	6,9
Буферность, расход 0,1 н раствора НСl, см <sup>3</sup>	0,22	0,32	0,28	0,52	0,19	0,15
Гранулометрический состав:						
С <sub>p</sub> , мм	0,78	1,1	0,65	0,80	0,62	0,95
К <sub>n</sub> , %	28,3	32,3	34,5	28,7	25,7	29,5

В качестве идентификационного признака свекловичного сахара принято рассматривать количественное содержание такого компонента как сапонин, переходящего в готовую продукцию из сахарной свёклы. В то же время присутствие сапонина является причиной сильного пенообразования сахарных растворов, поэтому нормирование данного показателя для промышленных предприятий выступает некой гарантией отсутствия заметного пенообразования растворов сахара [10]. В настоящее время в отечественной нормативной базе отсутствует метод определения сапонина в продукции сахарного производства. Допустимое значение опалесценции для сахара категорий ТС1 и ТС2 не нормируется.

В результате опытов по определению пенообразующей способности сахарных растворов выявлено, что в анализируемых растворах наблюдается колебание высоты слоя пены в пределах 1,2 – 2,9 см. Установлено, что на пенообразующую способность сахарных растворов оказывает существенное влияние гранулометрический состав кристаллов сахара. При этом отмечено, что наибольшее значение высоты слоя пены соответствует растворам, полученным из мелкокристаллического сахара с большой суммарной поверхностью кристаллов. Данный фактор может быть обусловлен более высоким содержанием в мелкокристаллическом сахаре ПАВ. Кроме того, наибольшее значение высоты пены была зафиксирована в растворах, приготовленных из белого сахара с высоким коэффициентом неоднородности, превышающим 36,5% (ОАО «Чишминский сахарный завод»).

В ходе экспериментальных исследований не было установлено взаимосвязи между чистотой, массовой долей редуцирующих веществ, зольности, влажности сахара и его способностью к пенообразованию. Одновременно с этим высокая склонность к пенообразованию сахарных растворов была выявлена при общем снижении качественных показателей сахара в целом.

Мутность раствора сахара и содержание в нём взвешенных частиц согласно ГОСТ 33222-2015 не являются строго установленными показателями для оценки качества сахара. Прозрачность раствора сахара, наличие нерастворимого осадка и других примесей контролируется органолептическим показателем «чистота раствора», который определяется расчетным путем

$$\text{Ч} = \frac{\text{СХ}}{\text{СВ}} \cdot 100, \%$$

где, СХ – содержание сахарозы в растворе, %

СВ – содержание сухих веществ, %.

В результате анализа мутности сахаросодержащих растворов было установлено, что наименьшей мутностью обладают растворы, полученные из сахара ООО «Теткинский сахарный завод» (4,26 ед. ICUMSA). Наибольшая мутность обнаружена у растворов сахара ООО «Ливны Сахар» (20,1 ед. ICUMSA).

При анализе сахаросодержащих растворов на наличие в них нерастворимых примесей было установлено, что в них содержится около 70–80% частиц в размерном диапазоне 5–25 мкм. В основном химический состав этих частиц представлен кремнием, щелочными и щелочноземельными металлами. Данные вещества могут встраиваться в кристаллическую решетку кристалла в процессе его роста. При этом установлено, что в основном в химический состав нерастворимых частиц входил кальций (0,23 г) из расчета на 1 кг сухих веществ раствора сахара. Наименьшее количество примесей приходилось на калий – 0,02 г.

Выявлено, что существует взаимосвязь между мутностью и цветностью сахара: чем ниже цветность раствора, тем меньше его мутность.

Описание количественного определения продуктов деструкции крахмала в настоящий момент зафиксировано в национальном стандарте ГОСТ Р 54641-2011 «Сахар. Метод определения крахмала» [25]. Метод определения продуктов деструкции крахмала позволяет достоверно

установить источник происхождения сахара. В некоторых анализируемых образцах отмечена вариация значений содержания крахмала в пределах 41,68 – 62,03 мг/кг, что говорит о них как о продуктах из сахара-сырца.

Из представленных результатов можно сделать вывод о стабильности данного показателя качества сахара.

Содержание солей кальция в кристаллах является одним из важнейших его качественных показателей. Установлено, что их содержание в образцах сахара полученных из сахара-сырца составляет около 0,016%, что примерно в 2 превышает их содержание по сравнению со свекловичным сахаром.

Наличие сульфитов в кристаллах сахара приводит к снижению щелочности их растворов. Содержание диоксида серы (SO<sub>2</sub>) анализировали по известной методике. Результаты исследований в этом направлении показали, что содержание сульфитов в исследуемых образцах составило 13,8 мг/кг. Данное значение соответствует требованиям международного стандарта – 15 мг/кг.

Общее содержание диоксида серы в исследуемых образцах кристаллического белого сахара различалось более чем в 5 раз (табл.8). Установлено, что в сахаре с более высокими качественными показателями зафиксировано наименьшее содержание диоксида серы.

Востребованным методом контроля примесей в сахаре, используемом при производстве алкогольных и безалкогольных напитков, а также некоторых видов кондитерской продукции, является флок-тест, который определяет флокулообразующую способность растворов при подкислении. Причиной образования флокул (хлопьев) в подкисленных растворах может быть наличие в сахаре сапонинов, продуктов деструкции крахмала, солей кальция, белков, пептидов и других микронутриентов. В России ввиду отсутствия аттестованной методики для определения флокулообразующей способности растворов применяют методики ICUMSA GS2/3-40B и GS2/3-40A, рекомендованные в работе [39]. Анализ флокулообразующей способности сахара показал, что высокий критерий флокулообразования

имели 33% образцов кристаллического белого сахара. Это может быть обусловлено наличием в кристаллах сахара повышенного количества сапонины. 17% исследуемых образцов показали отрицательный результат теста на флокулообразующую способность. При этом наилучшие результаты показал белый сахар ОАО «Лебедянский сахарный завод».

Важное значение при производстве сахарных сиропов имеет буферность сахара. Этот показатель особо важен при приготовлении сиропов для кондитерского производства. Буферность раствора – это показатель, который показывает устойчивость раствора к изменению его рН при добавлении в него кислоты или щелочи. Сахар, в который требуется добавить наибольшее количество кислоты или щелочи имеет наибольшую буферность [135].

В основном величина рН растворов сахара отечественных сахарных заводов составляла 7,0, однако при анализе образца ООО «Ливны Сахар» была установлена кислотная среда его растворов (рН=6,6).

Анализ данных табл. 11 позволяет заключить, что по гранулометрическому составу исследуемые образцы имеют некоторые различия. Так, заметно варьируется средний размер кристаллов – от 0,62 до 0,95 мм. При этом наблюдается и вариация значений коэффициента неоднородности – от 25,7 до 34,5%. Наилучшая однородность кристаллов была зафиксирована у сахара ООО «Теткинский сахарный завод» ( $K_n = 25,7\%$ ).

В ходе исследования спектрофотометрическим методом был уточнен элементный состав золы кристаллического белого сахара с использованием прибора Perkin Elmer [179,180] (табл.12).

Таблица 12 – Состав золы кристаллического белого сахара

Сахарные заводы	Общая зола, % к массе сахара	Элементарный состав золы кристаллов сахара, мг/кг							
		<i>K</i>	<i>Na</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>
ООО «Краснояржский сахарник»	0,020	62	13	37	0,11	2,0	0,23	0,25	0,4
ОАО «Лебедянский сахарный завод»	0,026	91	12	56	0,22	1,3	0,07	0,28	0,2
ОАО «Чишминский сахарный завод»	0,034	110	25	23	0,26	0,1	0,01	0,38	0,4
ООО «Ливны Сахар»	0,038	136	22	46	0,42	2,1	0,05	0,33	0,3
ООО «Теткинский сахарный завод»	0,016	60	15	26	0,09	0,4	0,01	0,14	0,2
ООО «Залегощенский сахарник»	0,036	110	12	16	0,31	0,6	0,05	0,25	0,5

Из табл. 12 видно, что состав золы в основном состоит из калия, натрия и кальция, тогда как содержание в нем Ni, Cu, Zn – очень незначительно.

Гранулометрический состав сахара представляет собой важный показатель как для характеристики пищевых продуктов, так и для уточнения условий закладки сахара на хранение, особенно если оно длительное. В кондитерском производстве использование сахара с размерами кристаллов более 0,96 мм, приводит к снижению качества получаемых из него сиропов; сахар с коэффициентом неоднородности превышающий 36% и средним размером кристаллов менее 0,55 мм может быть причиной пенообразования сахарных растворов [33].

Размер кристаллов белого сахара в соответствии с ГОСТ 33222-2015 имеет размерный диапазон 0,2–2,5 мм включительно [23]. Других дополнительных требований к гранулометрическому составу кристаллов сахара действующий отечественный стандарт не предусматривает. В соответствии с ГОСТ 12579-2013 «Сахар. Метод определения гранулометрического состава» [21] гранулометрический состав кристаллического белого сахара характеризуется как совокупность показателей, отражающих дисперсность и однородность кристаллов сахара.

Так, в частности, дисперсность кристаллов оценивается по их среднему размеру и массовой доле фракций определённого размера, а показатель однородности – по коэффициенту неоднородности (определяется графически с использованием латунных сит или расчетным путем) [43, 37, 145, 146, 147].

В табл. 13 представлены результаты сопоставления содержания различных фракций кристаллов в исследованных образцах сахара.

Таблица 13 – Состав ситовых фракций белого сахара сахарных заводов РФ

Сахарные заводы	Процентное содержание сахара в ситовых фракциях размером, мм						
	<0,25	0,25-0,315	0,315-0,5	0,5-0,63	0,63-0,8	0,8-1	>1
ООО «Краснояржский сахарник»	1,5	2,6	11,8	18,8	35,5	21,2	8,6
ОАО «Лебедянский сахарный завод»	2,6	4,2	12,7	18,0	24,4	24,7	13,4
ОАО «Чишминский сахарный завод»	2,3	4,6	13,2	16,5	22,5	22,0	18,9
ООО «Ливны Сахар»	1,7	5,3	10,8	19,8	21,7	22,1	18,6
ООО «Теткинский сахарный завод»	2,6	5,0	13,6	13,8	26,4	29,7	9,1
ООО «Залегощенский сахарник»	1,4	4,3	14,3	18,7	21,2	20,3	19,8

Из данных табл. 13 видно, что в кристаллическом белом сахаре в основном содержатся три фракции кристаллов с размерными диапазонами 0,50–0,63; 0,63–0,8 и 0,8–1,0 мм.

Исходя из результатов исследований в области оценки качества сахара отечественных предприятий можно заключить, что направление на повышение качества отечественного сахара актуально и требует соответствующих инновационных технологических решений. Поэтому решение о разработке комплексной технологии производства сахара для переработки сырья с различной сахаристостью и ее обоснование для этих условий является весьма актуальным для сахарной отрасли. Причем важным моментом этой проблемы является поиск новых путей его использования как сырья для создания новых видов продукции, что и вытекает из рис. 2.

## **ГЛАВА 3. КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ САХАРОЗЫ ИЗ ПЕРЕСЫЩЕННЫХ РАСТВОРОВ УТФЕЛЯ I КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

### **3.1. Обоснование диффузионной теории роста кристаллов из пересыщенных растворов**

Кристаллизация сахарозы – один из определяющих этапов в технологии производства белого сахара. По своей природе это явление представляет собой массообменный процесс включающий в себя образование и рост кристаллов из пересыщенного сахарного раствора путем диффузионного переноса на их поверхность молекул сахарозы [2,3,66, 130,138,151].

Несмотря на многочисленные исследования в области кристаллизации сахарозы на сегодняшний день пока нет единого научного подхода обосновывающего оптимальные условия его реализации [121].

В настоящее время наиболее приближенной к реальным условиям считается диффузионная теория кристаллизации сахарозы. Она базируется на концепции диффузионного переноса молекул из объема с высокой концентрацией сахарозы в растворе в область с более низкой концентрацией.

В основе диффузионной теории роста кристаллов лежит понятие о пограничной пленке, через которую происходит диффузия и встраивание молекул сахарозы в растущий кристалл. Основные закономерности диффузионного процесса кристаллизации сахарозы были изучены И.И. Андреевым, который полагал явление диффузии как процесс, лимитирующий рост и растворение кристаллов [1].

Сущность механизма роста кристаллов сахарозы наиболее полно была раскрыта П.М. Силиным. Согласно его представлениям, рост кристаллов при  $T > 323$  К связан с наличием градиента концентрации сахарозы, возникающего при диффузионном массопереносе ее молекул из раствора к поверхности кристалла. При этом начинает проявляться поверхностная диффузия молекул сахарозы и их встраивание (дислокация) в кристаллическую решетку растущего кристалла [113].

В соответствии с представлениями П.М. Сирина скорость кристаллизации сахарозы складывается из скорости диффузии молекул сахарозы через пограничный слой к граням кристаллов и скорости их перехода из растворенного состояния в кристаллическое. При этом определяющей является та фаза, скорость протекания которой ниже.

Возникновение максимума массового потока диффундирующей сахарозы при некотором пересыщении может быть объяснено следующим образом: движущей силой диффузионного массопереноса молекул сахарозы является разность концентраций пересыщенного и насыщенного растворов и по мере повышения пересыщения в растворе движущая сила увеличивается и достигает своего максимума. В то же время вязкость межкристального раствора в пограничном слое возрастает и в свою очередь это условие затрудняет перенос молекул сахарозы к поверхности кристалла [116].

Для углубленного изучения характера диффузии молекул сахарозы необходимо рассматривать процесс роста ее кристаллов в том числе с позиций термодинамики.

При промышленной кристаллизации сахарозы повышение температуры в вакуум-аппарате ведет к изменению реологических характеристик уфельных масс. В частности, снижается их вязкость и, как следствие, уменьшается толщина неподвижного слоя межкристального раствора вблизи кристалла, что в свою очередь способствует повышению скорости кристаллизации [99].

В результате роста температуры в вакуум-аппарате при кристаллизации, интенсифицируется и собственно диффузионный перенос молекул сахарозы к поверхности кристалла. Вследствие ускоренного движения молекул сахарозы к центрам кристаллизации, в соответствии с законом сохранения энергии, накопленная при перемещении скопления молекул сахарозы кинетическая энергия при торможении их до нулевой скорости на поверхности ЦК затрачивается на работу по их встраиванию в кристаллическую решетку ЦК, а также на потенциальную, внутреннюю, в

виде теплоты, энергию [74,75]. Очевидно, что данный фактор существенно влияет на протекание собственно процесса кристаллообразования в технологии получения кристаллического сахара и поэтому должен приниматься во внимание в производственных условиях.

### **3.2. Оценка влияния теплоты кристаллообразования на диффузионный перенос молекул сахарозы**

Для более детального изучения особенностей роста кристаллов сахарозы необходимо рассматривать этот процесс с позиций учета влияния теплоты кристаллообразования на эффективность самого процесса кристаллизации.

Для того, чтобы более точно определить оптимальные условия проведения процесса кристаллизации сахарозы при уваривании утфеля I кристаллизации в вакуум-аппаратах, было проведено количественное моделирование этого процесса [106].

Математическое описание процесса кристаллизации сахарозы основывалось на количественном анализе кинетики теплообмена между моделирующими грани кристаллов пластинами (рис.8) и межкристальным раствором в слое между двумя кристаллами.

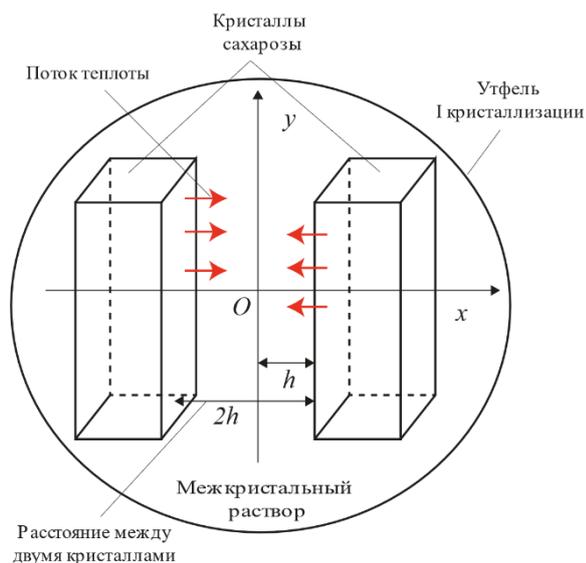


Рисунок 8 – Схема к расчету тепло-массообменного процесса в вакуум-аппарате

Для уточнения количественной оценки влияния теплоты кристаллообразования на процесс кристаллизации сахарозы ставилась задача: установить зависимость коэффициента диффузии от температуры на базе предварительно рассчитанного распределения теплоты между поверхностями двух кристаллов и, как результат этого расчета, оценить влияние коэффициента диффузии на эффективность процесса кристаллизации сахарозы в ВА [106].

Для обоснования теоретических представлений по исследуемой задаче было использовано одномерное уравнение нестационарной теплопроводности Фурье

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура, °С,  $\tau$  – время,  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Температура в растворе между двумя кристаллами определялась по формуле

$$T(x, \tau) = \left(1 - \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp\left(-\frac{\mu_n^2 a \tau}{h^2}\right)\right) \times \Delta T, \quad (2)$$

где  $\Delta T = T_{\text{среды}} - T_0$

При моделировании в качестве исходных данных принимали: размер  $\delta$  кристалла продукта и расстояние между центрами кристаллизации  $\delta=2h=50\times 10^{-6}\text{м}$ , коэффициенты теплопроводности ( $\lambda$ ) и температуропроводности выбирались ( $a$ ) как для воды при  $70^\circ\text{C}$ , соответственно,  $\lambda = 0,662 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $a = 16,1 \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ; коэффициент теплоотдачи от стенки к воде  $\alpha = 5830 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ , число Био  $Bi = \alpha h/\lambda = 0,22$ .

Результаты выполненных расчетов можно видеть на рис. 9, где приведены данные по зависимости температуры  $T$  (как без приращения температуры  $\delta T=0^\circ\text{C}$ , так и с приращением теплоты кристаллообразования  $\delta T=10^\circ\text{C}$ ) от времени  $\tau$  проведения процесса кристаллизации. В расчетах расстояние  $h$  было выбрано равное  $h = 125\times 10^{-6} \text{ м}$  и  $h = 250\times 10^{-6} \text{ м}$ , так при этих значениях обеспечивались благоприятные условия роста кристаллов.

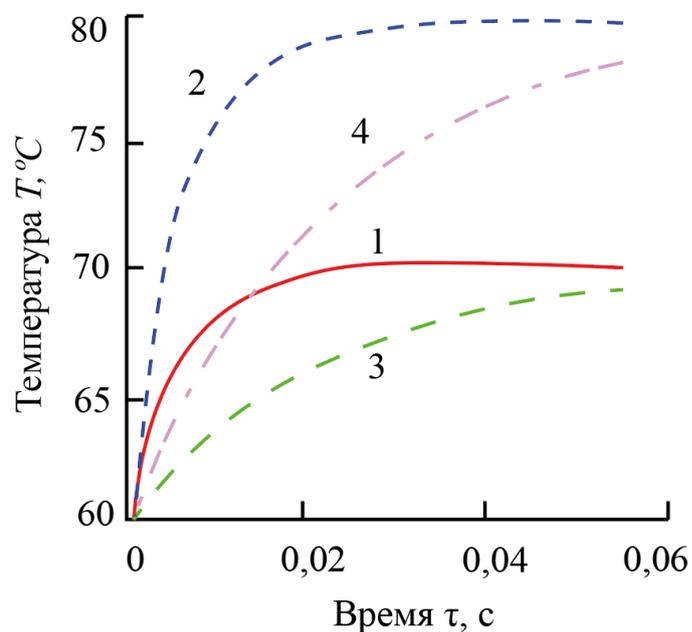


Рисунок 9 – Зависимости температуры  $T$   $^\circ\text{C}$  от времени  $\tau$  проведения процесса кристаллизации ( $h = 125\times 10^{-6} \text{ м}$ : 1 –  $\delta T = 0^\circ\text{C}$ ; 2 –  $\delta T = 10^\circ\text{C}$ ;  $h = 250\times 10^{-6} \text{ м}$ : 3 –  $\delta T = 0^\circ\text{C}$ , 4 –  $\delta T = 10^\circ\text{C}$ )

Из анализа данных рис. 9 следует, что как при  $h=125\times 10^{-6}$  м, так и при  $h=250\times 10^{-6}$  м тепловой режим в исследуемом растворе (межкристальном растворе) без учета (кривая 1,3) и с учетом теплоты кристаллообразования (кривая 2,4) устанавливается практически за доли секунды.

На рис.10 показана зависимость величины коэффициента диффузии  $D$  от температуры раствора на равном расстоянии между двумя соседними кристаллами.

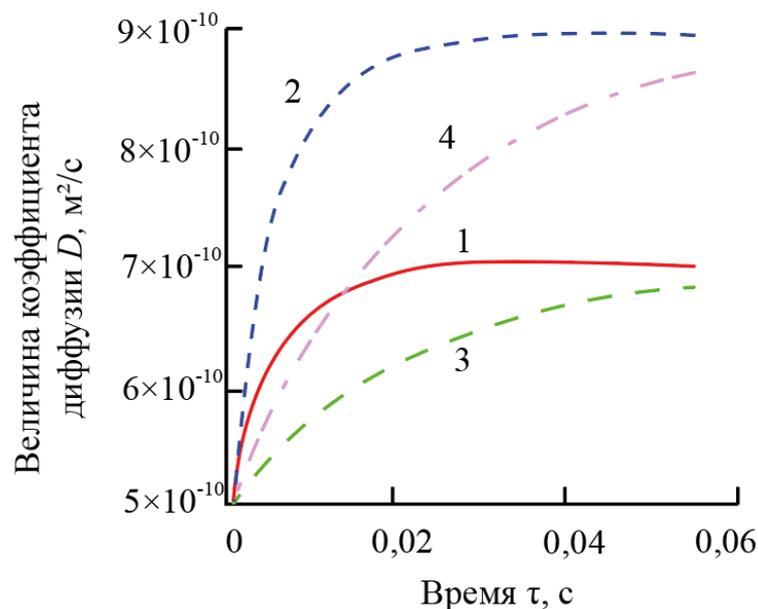


Рисунок 10 – Зависимости величины коэффициента диффузии  $D$  от времени  $\tau$  проведения процесса кристаллизации ( $h = 125\times 10^{-6}$  м: 1 –  $\delta T = 0^\circ\text{C}$ ; 2 –  $\delta T = 10^\circ\text{C}$ ;  $h = 250\times 10^{-6}$  м: 3 –  $\delta T = 0^\circ\text{C}$ , 4 –  $\delta T = 10^\circ\text{C}$ )

Из рис. 10 можно видеть, что с учетом влияния теплоты кристаллообразования изменяется величина коэффициента диффузии  $D$  (кривые 2 и 4 выше кривых 1 и 3), как на половине расстояния между кристаллами  $h = 125\times 10^{-6}$  м, так и с учетом расстояния в целом  $h = 250\times 10^{-6}$  м. Кроме того, анализ этих экспериментов показал, что проведение математического моделирования с учетом фактора наличия

теплоты кристаллообразования позволяет увеличить значение коэффициента диффузии. В свою очередь это способствует интенсификации диффузионного массопереноса именно в период формирования ЦК сахарозы.

Полученные данные были использованы для уточнения зависимости изменения массы  $M$  кристаллического сахара от времени проведения процесса кристаллизации  $\tau$  при следующих условиях:  $h = 125 \times 10^{-6}$  м: 1 –  $\delta T = 0^\circ\text{C}$ ; 2 –  $\delta T = 10^\circ\text{C}$ ;  $h = 250 \times 10^{-6}$  м: 3 –  $\delta T = 0^\circ\text{C}$ ; 4 –  $\delta T = 10^\circ\text{C}$  (рис. 11). При этом разность значения коэффициента пересыщения принимали  $\Delta c = 0,15$  [51].

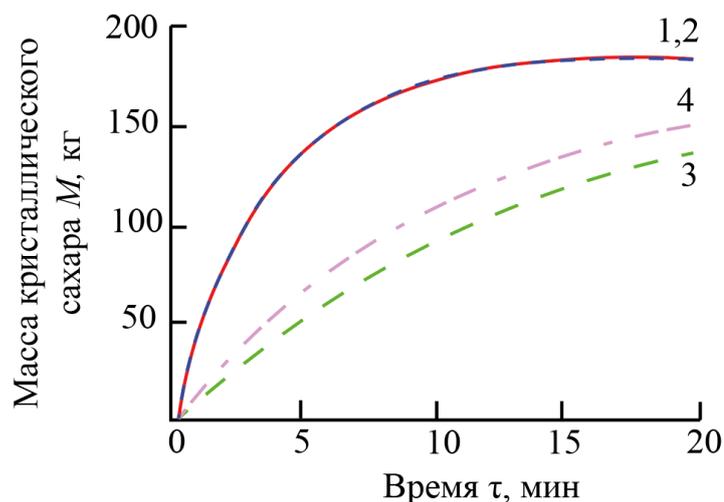


Рисунок 11 – Зависимости массы  $M$  кристаллического сахара от времени  $\tau$  проведения процесса кристаллизации

Отраженные на рис. 11 кривые 1,2,3,4 данных расчета находятся в соответствии с физическим смыслом исследуемого явления. В самом деле, масса выделившейся сахарозы в процессе кристаллизации с течением времени возрастает тем скорее, чем выше приведенная площадь поверхности частиц сахарозы (кривые 1,2 выше кривых 3,4), больше значения массообменных коэффициентов  $D$  и  $\beta$ .

В то же время значения производительности ВА без учета явления теплоты кристаллообразования (кривая 1), а также в условиях, когда эффект принимается во внимание (кривая 2) при размере частиц  $\delta = 250 \times 10^{-6} \text{ м}$ , практически не различаются. При наличии в утфеле частиц размером  $\delta = 500 \times 10^{-6} \text{ м}$  [160], и когда, например, когда  $\tau = 2 \text{ мин}$ ,  $\Delta c = 0,15$ , приращение (по абсолютной величине) температуры конденсации  $\delta T = 10^\circ \text{C}$ , относительная разница по выходу сахара с учетом эффекта теплоты составляет

$$[M(\delta T = 10^\circ \text{C}) - M(\delta T = 0)]/M(\delta T = 0) = 26,2 \%,$$

Очевидно, что такое возрастание выхода позволяет говорить о заметном влиянии теплоты кристаллообразования на этот процесс и, следовательно, ее необходимо учитывать в расчетах и при проведении его моделирования.

Дальнейшие исследования по оценке термодинамического фактора в этом направлении позволили уточнить количество выделившейся в процессе кристаллизации сахарозы тепловой энергии [109,190].

Так, если исходить из допущений о равномерности распределения центров кристаллизации в рабочем объеме ВА, то в этом случае правомерно допущение о наличии сферической симметрии смеси жидкость+твердое относительно центра  $O$ . В частности это относится к области  $0 < r < R$ , где, соответственно,  $r$  – радиус моделирующей частицу шара,  $R$  – среднее радиальное расстояние между шарами (рис.12).

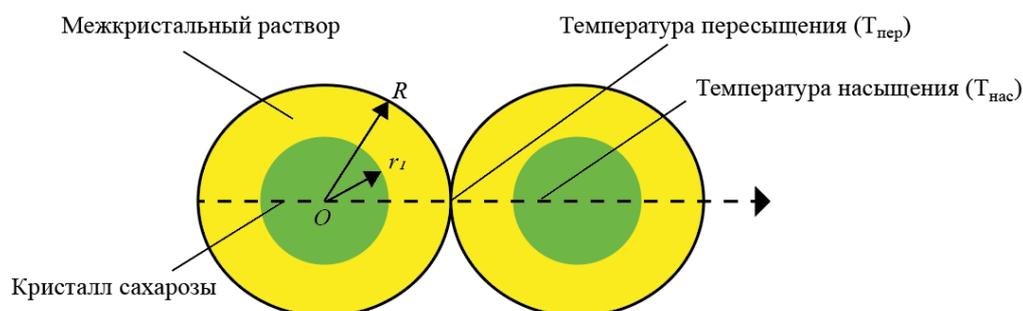


Рисунок 12 – Схема к расчету тепло-массообмена кристаллизующей сахарозы в вакуум-аппарате

Дальнейшие исследования позволили более углубленно оценить влияние теплоты кристаллообразования на процесс кристаллизации сахарозы в вакуум-аппарате. При моделировании исходили из следующих допущений: дан некоторый объем межкристального раствора в виде сферической области радиусом  $R$  и центром в точке  $O$  при температуре  $T_n$  (температуре насыщения), включающую моделирующей частицу сахарозы шар радиусом  $r = r_1$  и центром  $O$ .

В начальный момент времени действует мгновенный источник тепла силой  $Q_1$  (Дж), распределенный по сферической поверхности  $r = r_1$  (рис.10). Между поверхностью шара  $r = R$  и окружающей его средой происходит теплообмен в соответствии с граничным условием третьего рода. Требуется найти поле температуры в области  $0 < r < R$  и среднюю температуру рассматриваемой среды по времени.

Начальные условия задачи: имеется уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial [r T(r, \tau)]}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 [r T(r, \tau)]}{\partial r^2} \quad (\tau > 0, 0 < r < R), \quad (3)$$

где  $T(r, \tau)$  – температура, К;  $\tau$  – время, с;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

В качестве исходных условий принимается то, что

$$T(r, 0) = \begin{cases} (T_0 + \delta T) & \text{при } r \leq r_1 \\ T_0 & \text{при } r > r_1 \end{cases}, \quad (4)$$

откуда

$$\delta T = \frac{Q_{уд}}{c_0}, \quad (5)$$

которая обусловлена явлением кристаллообразования, а также разность температуры на поверхности шара  $r = r_1$  и среды, К;  $Q_{уд}$  – удельная теплота кристаллообразования, Дж/кг,  $c_0$  – теплоемкость раствора, Дж/(кг·К).

В качестве граничных условий принимается, что

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0, T(0, \tau) \neq \infty, \text{ при } \tau > 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} + H[T(R, \tau) - T_1] = 0, \quad (7)$$

где  $T_0$ ,  $T_1$  – соответственно, температура, (К) среды (утфеля) в начальный момент времени и на поверхности сферы  $r = R$ , м;  $H = \alpha/\lambda$ ,  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности Вт/(м·К),

Если в качестве замены выразить

$$t(r, \tau) = T(r, \tau) - T_1, \quad (8)$$

то краевая задача (3)-(7) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial [rt(r, \tau)]}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 [rt(r, \tau)]}{\partial r^2} \quad (\tau > 0, 0 < r < R), \quad (9)$$

$$t(r, 0) = n \begin{cases} (\Delta t + \delta T) \text{ при } r \leq r_1 \\ \Delta t \text{ при } r > r_1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0, t(0, \tau) \neq \infty, \text{ при } \tau > 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} + Ht(R, \tau) = 0, \quad (12)$$

где  $t$  – приведенная температура,  $\Delta t = T_0 - T_1$ ,  $\delta T$  определяется по (5).

Решение краевой задачи (9)-(12) записывается по соотношению

$$t(r, \tau) = \frac{b}{4\pi R} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{rr_1} \cdot \frac{\mu_n}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n} \sin \frac{\mu_n r_1 / R}{r_1} \sin \frac{\mu_n r / R}{r} \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (13)$$

$$b = V \cdot t(r, 0),$$

$V = 4\pi r_1^3 / 3$  – объем кристалла сахарозы, м<sup>3</sup>,  $t(r, 0)$  задано по (10), К,

$\mu_1, \mu_2$ , являются, корнями характеристического уравнения,

$$\operatorname{tg} \mu = -\mu / (Bi - 1), \quad (14)$$

$Bi = \alpha h / \lambda$  – критерий Био (тепловой),  $Fo = a\tau / R^2$  – критерий Фурье.

Для практического применения более удобно использовать вместо уравнения (13) соотношение имеющее вид

$$t(r, \tau) = \frac{b}{4\pi R} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{rr_1} \cdot \frac{[(Bi-1)^2 + \mu_n^2]^{1/2} A_n}{Bi} \sin(\mu_n r_1 / R) \sin(\mu_n r / R) \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (15)$$

где  $A_n$  – табуированные коэффициенты.

Таким образом, решение задачи (9)-(12) с учетом замены (8) принимает вид

$$T(r, \tau) = T_1 + t(r, \tau), \quad (16)$$

где  $t(r, \tau)$  вычисляется по (15).

Осредненное по объему  $0 < r < R$  значение температуры рассчитывается по формуле

$$T_{\text{ср}}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R T(r, \tau) r^2 dr, \quad (17)$$

где входящее под знаком интеграла выражение  $T(r, \tau)$  определяется по зависимости (16).

Расчет температуры и средней температуры в вакуум-аппарате по времени проведения процесса проводится на базе зависимостей (16), (17).

Очевидно, что предположение о равномерном распределении ЦК по объему ВА позволяет рассчитанные тепловые характеристики для выделенного элементарного объема радиусом  $R$  считать справедливыми и для всего рабочего объема ВА.

В качестве исходных данных задачи, которые принимались условно: радиус кристалла продукта составляет  $r_1=10^{-5}$ ,  $2 \times 10^{-5}$  м; объемная концентрация продукта (СВ) –  $c=40$ ,  $50$  % ( $c=0,4$ ;  $0,5$ ); плотность межкристалльного раствора (ульфеля) –  $\rho=1450$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент теплопроводности и теплоемкости (как для воды при 80°C), соответственно –  $\lambda=0,56$  Вт/(м·°С),  $c_0=1250$  Дж/(кг·К), коэффициент теплоотдачи –  $\alpha=240$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) [190].

В соответствии с выбранными значениями параметров получили: коэффициент температуропроводности составил  $a = \lambda / (c_0 \cdot \rho) = 3,09 \times 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Приведенный радиус элементарного объема рассчитывался по зависимости

$$R = r_1 \cdot c^{-1/3}, \quad (18)$$

число Био  $Bi = \alpha \cdot r_1 / (\lambda \cdot c^{1/3})$ .

Величина удельной теплоты кристаллообразования сахарозы принималась по данным статьи [106] и равнялась  $Q_{\text{уд}} = 13,42$  кДж/моль (39,24 кДж/кг).

Численное моделирование исследуемой задачи проводилось с использованием программных продуктов информационной среды MATHCAD.

В расчетах суммы согласно (14)-(18) сохранялось четыре слагаемых при значениях входящих в (15) параметров  $A_n, \mu_n$ , согласно данным [67].

При этом для определенности в выполненных расчетах предполагалось, что в начальный момент времени температура  $T_0$  межкристального раствора и температура  $T_1$  на границе выделенной сферической области  $r = R$  за весь период наблюдения составляет  $80^\circ\text{C}$ , т.е. входящая в (11) величина  $\Delta T$  принимается равной нулю.

Результаты расчета в соответствии с принятыми значениями параметров теплового процесса в зависимости от объемной концентрации твердой фазы в растворе, времени  $\tau$ , как и температуры  $T$  на поверхности  $r_1$  кристалла, а также осредненной по объему утфеля температуры  $T$  представлены на рис. 13 и 14.

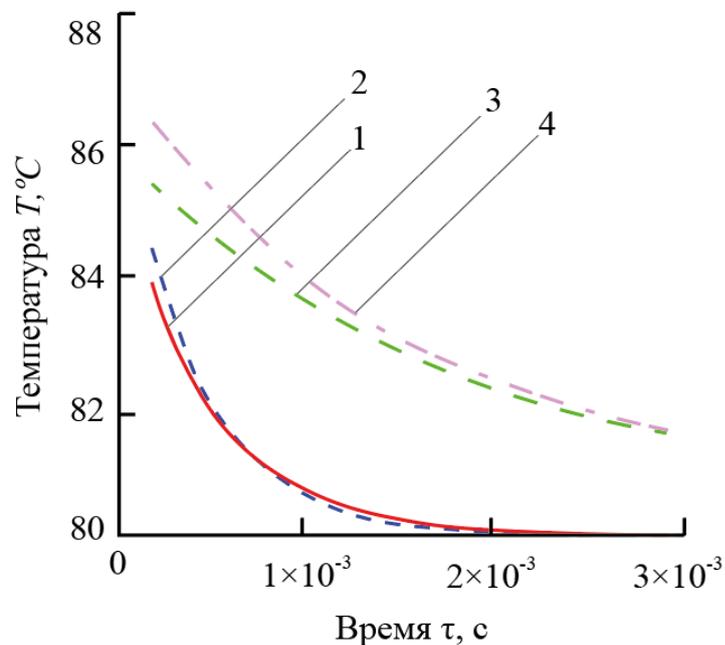


Рисунок 13 – Зависимости температуры  $T$  на поверхности  $r_1$  кристалла от объемной концентрации  $c$  твердой фазы в растворе и времени  $\tau$  проведения процесса кристаллизации

( $r_1 = 1 \cdot 10^{-5}$  м: 1 –  $c = 40\%$ , 2 –  $c = 50\%$ ;  $r_1 = 2 \cdot 10^{-5}$  м: 3 –  $c = 40\%$ , 4 –  $c = 50\%$ )

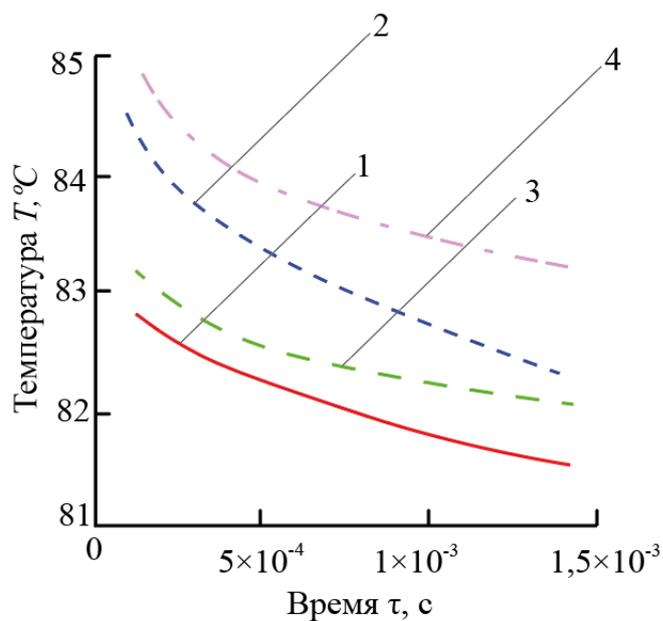


Рисунок 14 – Зависимости осредненной по объему утфеля температуры  $T$  от объемной концентрации  $c$  твердой фазы в растворе и времени  $\tau$  проведения процесса кристаллизации ( $r_1 = 1 \cdot 10^{-5}$  м: 1 –  $c = 40\%$ , 2 –  $c = 50\%$ ;  $r_1 = 2 \cdot 10^{-5}$  м: 3 –  $c = 40\%$ , 4 –  $c = 50\%$ )

Из приведенных на рис. 13 и 14 кривых 1–4 видно, что процесс передачи, выделяющейся в сахаросодержащий раствор теплоты кристаллообразования, действительно занимает тысячные доли секунды. Это подтверждает обоснованность трактовки данного явления, в целом, как генерируемого мгновенным тепловым источником. Отсюда также следует, что тепловой режим в межкристалльном растворе стабилизируется почти мгновенно.

Общей особенностью кривых рис. 13 и 14 является также то, что такому теплообмену соответствует экспоненциальное снижение температуры по времени его проведения.

Характер кривых на рис. 13 и 14 также подтверждает соответствие физическому смыслу исследуемой в работе проблемы. Поскольку объектом исследования являются частицы, различающиеся по радиусу почти в два раза, то частицы меньшего размера и, следовательно, имеющие большую удельную поверхность (а значит большей теплоотдачей) отдают тепло быстрее частиц

большого радиуса. То есть крутизна кривых 1,2 температуры частиц радиусом  $r_1 = 1 \cdot 10^{-5}$  м заметно выше, чем у кривых 3,4, то есть частиц, имеющих радиус в два раза больше. В свою очередь, аккумуляция тепла, а значит, и количество выделенной кристаллом радиусом  $r_1 = 2 \cdot 10^{-5}$  м теплоты по сравнению с кристаллом радиусом в 2 раза меньшим, выше в восемь раз (на рис.14 кривых 3,4 значительно выше кривых 1 и 2).

Таким образом, в результате численного эксперимента в условиях, приближенных к процессу кристаллизации сахарозы в вакуум-аппарате установлено повышение температуры в результате кристаллообразования на 7,5%. Причем это явление происходит практически мгновенно ( $\sim 2 \times 10^{-3}$  с) и соответствует реальным условиям проведения кристаллизации в промышленных условиях.

### **3.4. Разработка эффективной технологии уваривания утфеля I кристаллизации**

В процессе исследования ставилась задача обеспечить повышение выхода и физико-химических показателей кристаллического белого сахара. При этом одним из направлений работ в этом направлении являлось уточнение условий уваривания I кристаллизации. Для решения поставленных задач предварительно было проведено математическое моделирование процесса кристаллизации сахарозы с анализом его технологических параметров и учетом особенностей его реализации в производственных условиях.

В основе экспериментальных исследований была использована модифицированная типовая технология получения утфеля, которая включает в себя первоначальное сгущение сиропа с клеровкой в ВА до коэффициента пересыщения 1,25–1,30. Далее для формирования центров кристаллизации в сироп вводят сахарную пудру, которые затем закрепляют и наращивают на подкачках смеси сиропа с клеровкой при регулировании величины коэффициента пересыщения от 1,08–1,12 до 1,12–1,15. Дальнейшее

уваривания утфеля проводят до содержания в нем 92,0–92,5% сухих веществ, после чего его выгружают из вакуум-аппарата в приемную утфелемешалку. При спуске утфельной массы из ВА ее температура снижается на 5–6°С, поэтому для восстановления температурного диапазона утфель опрыскивают водой температурой 75°С. Из утфелемешалки утфель I кристаллизации направляют на центрифугирование с получением белого сахара, первого и второго оттеков [103].

В ходе этих исследований также были уточнены как расчетные, так и заводские показатели, а также особенности и параметры реализации уваривания утфеля I кристаллизации. Особое внимание было уделено режимам и возможностям интенсификации процесса уваривания утфеля под разряжением, что позволило разработать усовершенствованный способ уваривания утфеля I кристаллизации (Патент № 2771069 С1) [90]. На рис. 15 представлена схема реализации способа по Пат. № 2771069.

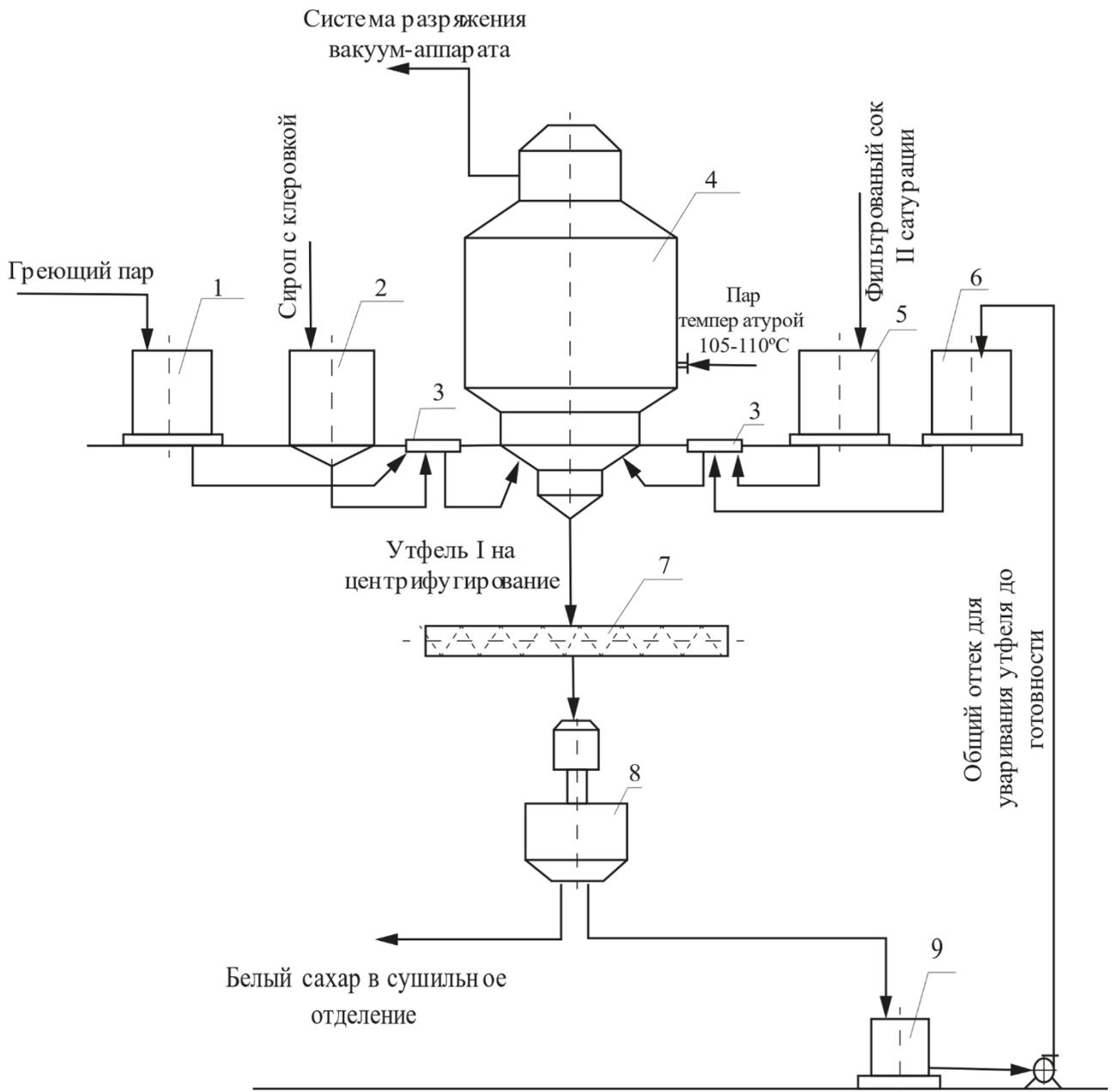


Рисунок 15 – Способ получения утфеля I кристаллизации (Пат. 2771069): 1 – паросборник; 2 – сборник сиропа и клеровки; 3 – коллектор; 4 – вакуум-аппарат; 5 – сборник фильтрованного сока II сатурации; 6 – сборник общего оттока на площадке вакуум-аппаратов; 7 – приемная утфелемешалка; 8 – центрифуга; 9 – сборник общего оттока после центрифугирования

Отличительной особенностью нового способа является то, что после набора смеси сиропа с клеровкой сахаров II и III продуктов в вакуум-аппарат процесс ее сгущения интенсифицируют вводом в утфель водяного пара из отдельного паросборника. При этом пар для этих целей имеет температуру в диапазоне 105–110°C (что соответствует пару с III корпуса выпарной установки).

В коллекторах, расположенных между рядами паровой камеры, имеются форсунки для вдувания пара в каждую кипяtilьную трубку. Отверстия форсунок имеют диаметр примерно 0,8–1 мм с углом наклона 15–30° к вертикальной оси кипяtilьной трубки (рис. 16). Результаты ранее проведенных авторами [155] исследований показали, что ввод пара в подтрубное пространство вакуум-аппарата позволяет интенсифицировать теплообмен, а значит и кристаллизацию сахарозы при уваривании утфеля.

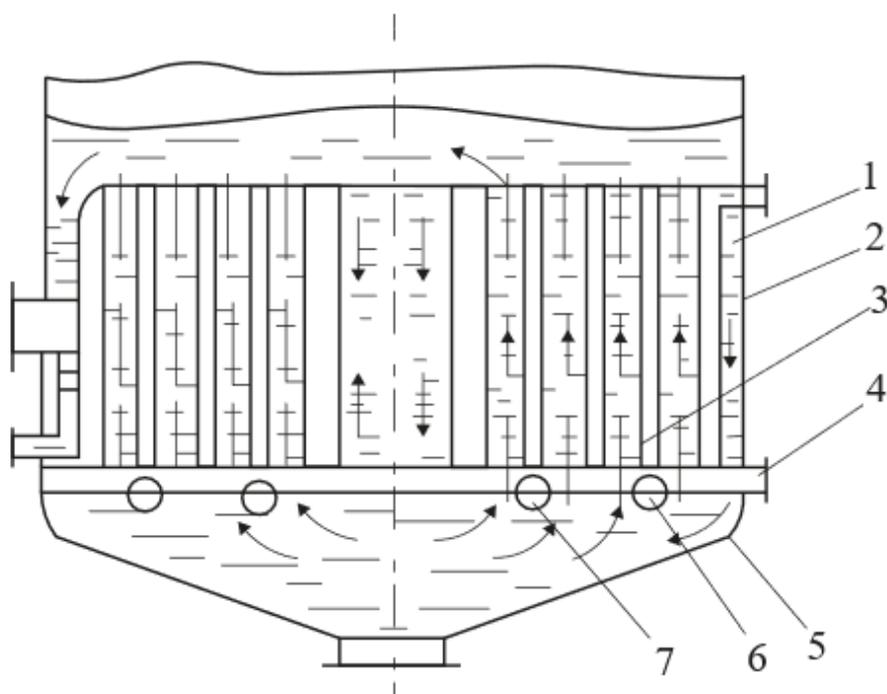


Рисунок 15 – Устройство для гидродинамического усиления циркуляции коллекторного типа: 1 – корпус; 2 – греющая камера; 3 – распределительный коллектор; 4 – патрубок для вдувания пара; 5 – кипяtilьные трубки; 6 – форсунка; 7 – отверстие для вдувания пара

Центры кристаллизации вводят в пересыщенный сироп с клеровкой при коэффициенте пересыщения 1,25–1,3. С этой целью используют сахарную пудру с отбором после ее фракционирования кристаллов размером 0,150–0,180 мм. После образования ЦК закрепляют подкачками сиропа с клеровкой сахаров второй и третьей кристаллизации концентрацией в диапазоне 65–72% сухих веществ выдерживая температурный режим в диапазоне 74–76°C и затем начинают их наращивать с использованием для обогрева паровой камеры вакуум-аппарата греющего пара температурой 105–110°C.

В ходе проведенных опытов было установлено, что лучшие результаты достигаются при введении в пересыщенный сироп предварительно фракционированной затравки в виде сахарной пудры с размерным диапазоном 0,150–0,180 мм. Эксперименты показали, что при этих условиях сокращается содержание конгломератов и не наблюдается заметного снижения скорости кристаллизации сахарозы из межкристального раствора.

При этом было также установлено, что обогрев паровой камеры греющим паром в диапазоне температур 105–110°C позволяет сократить время на уваривание утфеля, сохранив при этом его центрифугальные характеристики.

По завершению подкачек сиропа с клеровкой в утфеле вводом в него фильтрованного сока II сатурации снижают пересыщение до 1,10–1,12. По завершению подкачек сиропа в смеси с клеровкой дальнейшее уваривание утфеля ведут на подкачках общей смеси оттеков с учетом их качественных показателей.

Окончательное сгущение утфеля проводят до содержания в нем сухих веществ 93,0–93,5% при температуре 72–74°C. Перед спуском из вакуум-аппарата утфель раскачивают первым оттеком до содержания в нем 91,5–92,0% сухих веществ.

Результаты экспериментальных исследований показали, что по предлагаемой технологии наиболее рационально проводить сгущение утфеля при температуре 72–74°C. Это обусловлено тем, что в данном температурном

диапазоне было установлено более полное обессахаривание межкристального раствора утфеля.

Проведенные опыты позволили также определить необходимый интервал по содержанию в сгущаемом утфеле сухих веществ. В частности, эксперименты подтвердили, что при запредельных значениях по сухим веществам, т.е. менее 93,0% или более 93,5%, ухудшаются условия подготовки утфеля к спуску в утфелемешалку и в частности его текучесть, что не позволяет обеспечить необходимый выход и качества сахара. Поэтому для исключения подобных проблем, а именно для понижения вязкости и тем самым улучшения подвижности утфеля при его спуске из вакуум-аппарата дополнительно предусматривается ввод в утфельную массу первого оттека утфеля I кристаллизации для его раскачивания до содержания в нем сухих веществ в интервале 91,5–92,0%.

После спуска утфеля в приемную утфелемешалку были проведены исследования по подготовке его к центрифугированию. В этой связи были отработаны оптимальные технологические условия реализации этого процесса. Разделения уваренного утфеля I кристаллизации осуществляли в фильтрующей центрифуге периодического действия марки ФПН-1251Т-01. С этой целью в центрифуге предварительно были созданы условия насыщения воздуха влагой. Для этого пар температурой 130–140°C подавали внутрь ротора центрифуги для повышения температуры в этом объеме до необходимой. Разность между чистотой второго и первого оттеков утфеля первой кристаллизации выдерживали в диапазоне 5,0–7,0%. После отделения 85–90% межкристального раствора (первого оттека) начинали промывание кристаллов сахара промывной водой в количестве 1,8–2,2% к массе утфеля при температуре 80–90°C.

Уваривание утфеля I кристаллизации по предлагаемому и известному способу проводили параллельно, а полученные результаты были сопоставлены по чистоте и содержанию сухих веществ утфеля, выходу кристаллов из центрифуги, цветности раствора сахара, содержанию золы и

редуцирующих веществ, среднему размеру кристаллов и коэффициенту неоднородности.

Усредненные результаты уваривания утфеля I кристаллизации приведены в табл. 14.

Таблица 14 – Усредненные результаты уваривания утфеля I кристаллизации

Показатели процесса получения белого сахара	Технология получения	
	Предлагаемый способ	Известный способ
Чистота утфеля в вакуум аппарате, %:	91,5	91,7
Содержание сухих веществ в вакуум аппарате, %:	91,70	91,75
Выход кристаллов сахара из центрифуги, % к массе утфеля	48,9	48,3
Физико-химические показатели качества белого сахара: цветность, ед.опт.пл.	102	104
Зола, %	0,012	0,015
Редуцирующие вещества, %	0,020	0,025
Гранулометрический состав: С <sub>р</sub> , мм К <sub>н</sub> , %	0,78 22,1	0,73 22,8
Продолжительность, мин уваривания утфеля I кристаллизации центрифугирования утфеля I кристаллизации	185 45	160 35

Из приведенных в табл.14 данных видно, что по сравнению с известным предложенный способ позволяет увеличить выход кристаллов сахара из центрифуги на 0,6% к массе утфеля. Причем по предлагаемой технологии возрастает не только выход сахара, но и повышаются его качественные показатели. Помимо этого, по предлагаемому способу потери в продуктивном отделении снижаются на 0,02–0,03%.

Таким образом, на основе проведенных исследований по математическому моделированию уточнены условия уваривания утфеля I кристаллизации из промышленных сахарсодержащих растворов. Разработан

новый способ уваривания утфеля I кристаллизации, который позволяет повысить выход и качественные характеристики кристаллического белого сахара.

## **ГЛАВА 4. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОРОДНЫХ ЦЕНТРОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ САХАРОЗЫ**

Образование центров кристаллизации (ЦК) в растворах идентично возникновению в них зародышей новой фазы. Зародыши в пересыщенных растворах возникают в результате объединения или присоединяя к ним молекул растворенного вещества до достижения «критических» размеров и таким образом они приобретают способность к дальнейшему росту. Зародыши подобного уровня называют центрами новой фазы, или центрами кристаллизации (ЦК) [66,139,148].

Следует отметить, что механизм образования ЦК в настоящее время несмотря на многочисленные исследования, еще окончательно не выявлен. Впервые образование новой затравочной фазы с позиций термодинамики было дано Д. Гиббсом, а затем его механизм был уточнен М.Фольмером. Именно М. Фольмер дал понимание образования новой фазы в стационарных условиях [31,57,142].

Естественно, что производственные условия нельзя отнести к стационарным, поскольку кинетика образования ЦК протекает во времени [168,170,188,189].

Термодинамическая теория образования новой фазы раскрывает механизм кристаллообразования с позиции послойного роста кристаллов. Некоторые отличия от этого подхода имеет молекулярно-кинетическая теория, сформулированная И.Н.Странским и Р.К.Каишевым [129].

В основе молекулярно-кинетической теории лежит представление о том, что формирование критических по размерам зародышей протекает за счет постепенного присоединения к ним молекул сахарозы.

Кроме того, исследования в этом направлении с позиций химической кинетики протекания процесса кристаллизации сахарозы были проведены Е.В.Хамским [144,145,146]. Согласно его представлениям, структуры дозародышевых образований могут присутствовать и в насыщенном и в пересыщенном растворе. Переход этих структур в зародыш может

осуществляться благодаря присоединению к ним одной или более простейших частиц.

Описание роста кристаллов с точки зрения диффузионной теории основано на понятии о ламинарной пограничной пленке толщиной  $\delta$ , через которую молекулы сахарозы диффундируют к поверхности растущего кристалла. Основной стадией роста кристаллов является процесс диффундирования молекул кристаллизующейся сахарозы из раствора к поверхности раздела ее фаз. Затем происходит адсорбция молекул сахарозы на поверхности кристалла с одновременным встраиванием ее молекул в кристаллическую решетку, обеспечивая при этом рост кристаллов [113]. Однако эта теория не принимает во внимание влияние размеров кристаллов на кинетику процесса кристаллизации сахарозы [70].

При реализации этого процесса из промышленных сахаросодержащих растворов следует учитывать то, что от условий образования центров кристаллизации в значительной степени зависят однородность, форма и размерность кристаллов. Возможность зародышеобразования, как и понимание механизма его протекания требует особого внимания в связи с возросшими требованиями не только к выходу, но и качеству кристаллического белого сахара. Следует отметить, что несмотря на важность процесса зародышеобразования его механизм требует более глубоких знаний для дальнейшего совершенствования процесса кристаллизации сахарозы.

Центры кристаллизации при промышленной кристаллизации сахарозы создают искусственно. В самом начале процесса уваривания коэффициент пересыщения сиропа доводят до 1,25–1,3, после чего для образования во всем его объеме новых центров кристаллизации в него вводят затравочный материал [66].

Для формирования центров кристаллизации в процессе уваривания утфеля I кристаллизации на отечественных сахарных предприятиях используют разнообразные затравочные материалы: сахарную пудру,

специальные пасты (затравочные суспензии), а в последнее время с этой целью применяют и маточный утфель [31,66,139,148].

Использование сахарной пудры является самым простым и дешевым способом заправки затравочных кристаллов. Такая технология не требует хорошей подготовки варщиков утфеля и не всегда обеспечивает эффективные условия для образования ЦК. К тому же гранулометрический состав сахарной пудры не позволяет обеспечить необходимую однородность ЦК. Это вызвано тем, что она представляет собой продукт дробления кристаллов и большей частью состоит из мелких осколков кристаллов сахара неправильной формы [30,178].

Развитие технологии с позиций совершенствования кристаллизации сахарозы потребовало разработки новых инновационных решений в области формирования ЦК. Этим можно объяснить, например, появление специальных паст и суспензий. Для получения данных затравочных материалов кристаллы сахара измельчают в шаровой мельнице, которые затем смешивают с изопропиловым или бутиловым спиртом. При этом полученную смесь выдерживают в соотношении 1:(2–2,2). Содержание центров кристаллизации с размерным диапазоном 10–25 мкм в 100 г полученной суспензии должно составлять не менее  $150 \times 10^9$  ЦК. Считается, что при использовании шаровой мельницы получают кристаллы близкие по форме к шару. По мнению этих авторов [13,29,131,141,153,161] шаровая форма позволяет быстрее восстанавливать их естественную форму.

В соответствии с представлениями Л.А.Сапроновой [105], использование в качестве затравочного материала специальных суспензий с размером частиц 10–25 мкм позволяет более четко регулировать их количество с улучшением гранулометрических показателей утфеля.

По мнению некоторых исследователей наиболее целесообразно работать с центрами кристаллизации с размером 150–200 мкм [66,113].

Так, по мнению Christian Moller [166] наибольший риск срастания кристаллов вероятен при их размерах менее 50 мкм, причем в результате этого

процесса образуются конгломераты (друзы). Однако по достижению кристаллами размеров около 150 мкм этот риск значительно снижается.

Методы заводки кристаллизационных центров с использованием сахарной пудры, затравочной суспензии или пасты с технологической точки зрения имеют некоторые отличия. Это объясняется тем, что микрокристаллы сахарной пудры представляют собой в основном обломки кристаллов сахарозы. В начале уваривания утфеля, они достраиваются до достижения своих форм, а затем растут как обычные кристаллы в соответствии с законами кристаллографии. Причем процесс достраивания поврежденных кристаллов проходит несколько быстрее чем кристаллов, имеющих обычную моноклинную форму [102].

Технологические требования к увариванию утфеля (высокий выход и однородность кристаллов, хорошая центрифугируемость) сложнее достигаются при использовании сахарной пудры, затравочных суспензий и паст, имеющих разнородный гранулометрический состав. Известен ряд способов производства затравочных материалов из пересыщенных сахарных растворов. Работы в этом направлении велись И.Ф. Бугаенко, С.М. Петровым, Н.М. Подгорновой и Л.А. Сапроновой и др. [11,29,96,105]. Их исследования в основном были направлены на улучшение дисперсного состава затравочных кристаллов. В частности, известны разработки по использованию с этой же целью части утфеля в качестве кристаллической основы при уваривании утфелей для различных стадий кристаллизации.

Сегодня предпочтение отдается вакуум-аппаратам оснащенных циркулятором для интенсивного перемешивания утфельной массы, что не только способствует формированию ЦК, но и ускоряет рост кристаллов, обеспечивая при этом их лучшую однородность [131,155].

Известны также разработки [27,155,161] по использованию маточного утфеля в качестве затравочного материала для ступеней различных кристаллизаций. Данная технология лишена недостатков таких затравочных

материалов как сахарная пудра или затравочные суспензии, но достаточно трудоемка в организации подобного процесса. Кроме того, для приготовления маточного утфеля необходимы специальные охлаждающие устройства, где формируют и доводят до требуемого размера ЦК. К преимуществам маточного утфеля можно отнести возможность улучшить равномерность затравочных кристаллов по сравнению с другими известными способами.

К подобным способам можно отнести технологию, разработанную в Брауншвейгском институте (Германия). В соответствии с ней сначала методом размола кристаллов сахара в изопропиловом спирте получают затравочную суспензию Slurry. Причем для предотвращения агломерации кристаллов и увеличения вязкости суспензии в нее вводят насыщенный сахарозой глицерин.

При этом в самом начале в утфель вводят маточную основу выдерживая ее в насыщенном состоянии. Применение маточного утфеля в производстве сахара позволяет снизить время уваривания утфеля, повысить его качество и гранулометрический состав сахара. Это объясняется тем, что при уваривании утфеля I кристаллизации используют расчетное количество маточного утфеля с требуемым содержанием кристаллов [58, 127,141].

Помимо однородности к важным технологическим параметрам следует отнести и величину линейных размеров кристаллов. Неравномерность состава кристаллов сахара в утфеле может быть причиной повышенного расхода воды как в процессе уваривания утфеля, так и при его центрифугировании. Кроме этих условий возрастает количество образуемых оттеков, как и возвратов на их повторную переработку по схеме продуктового отделения, что потребует дополнительных энергетических затрат. Неоднородность кристаллов готовой продукции не только усложняет процесс сушки сахара, но и повышает запыленность сахарной пудрой при закладке его на хранение [155].

Таким образом, важной составляющей комплекса мероприятий по совершенствованию процесса кристаллизации сахарозы является в первую очередь обеспечение однородности вводимых в утфель ЦК. Важность данной

проблемы подтверждает необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на создание новых инновационных подходов по обеспечению высокой однородности ЦК, а также на разработку эффективных способов их формирования в процессе уваривания утфеля I кристаллизации.

#### **4.1. Математическое моделирование процесса фракционирования затравочных центров кристаллизации**

Анализ существующих теоретических и практических аспектов зародышеобразования кристаллов сахарозы в промышленных условиях показал, что наиболее целесообразно использовать для заводки центров кристаллизации маточный утфель. Поскольку существенное влияние на кристаллизацию сахарозы оказывает однородность вводимых в пересыщенный сахаросодержащий раствор центров кристаллизации, необходимо, с одной стороны усовершенствовать технологию подготовки маточного утфеля, а с другой располагать обоснованной методикой количественной оценки статистических характеристик кристаллов при их обработке [124,191]. Для уточнения условий формирования центров кристаллизации и их последующего наращивания были проведены соответствующие исследования в области фракционирования центров кристаллизации.

Маточный утфель представляет собой суспензию, состоящую из кристаллов сахарозы и межкристального раствора. Существуют различные механические методы фракционирования суспензий, основанные на действии гравитационного поля или центробежных сил. Однако по сравнению со свободным отстоем, процесс разделения суспензий на фракции в центробежном поле протекает значительно быстрее [9].

Для разделения суспензии в центробежном поле используют центрифуги или сепараторы. Основная рабочая полость центрифуг состоит из цилиндрического ротора, причем различают отстойное и

фильтрационное центрифугирование. Данный подход может быть применим для разделения плохо фильтрующихся слабо концентрированных суспензий, классификации в них частиц по крупности и удельному весу, обезвоживания влажных материалов [53].

К наиболее точным методам разделения суспензий с целью выделения из них фракции частиц с заданным размерным диапазоном относят сепарирование. Данный метод нашел широкое применения в различных отраслях пищевой промышленности (молочной, мясной, парфюмерно-косметической, крахмало-паточной, спиртовой и др.). Одним из рабочих органов центробежного сепаратора является пакет из соосных близко стоящих друг от друга имеющих форму усеченных конусов тарелок, а другим – периферийный объем барабана сепаратора [9]. Путем сепарирования решается важный вопрос о равномерном гранулометрическом составе продукта. Важно отметить, что высокая однородность выделяемой фракции достигается из-за возможности регулирования расстояния между тарелками в сепараторе, что в свою очередь влияет на классификацию и выделение необходимых фракций кристаллов.

Для выбора эффективного технологического режима проведения процесса выделения из маточного утфеля центров кристаллизации требуемого размерного диапазона, в ходе экспериментальных исследований маточный утфель подвергали процедуре фракционирования методом сепарирования. Причем для этой цели был использован центробежный сепаратор АІ-ОЦМ-5 [53,107]. Конструктивные и режимные параметры машины:

- номинальная производительность  $Q_0 = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- число тарелок  $Z = 53$ ;
- полуугол конусности тарелки  $\alpha = 40^\circ$ ;
- минимальный и максимальный диаметр тарелки, соответственно,  $d_0 = 0,05, d_1 = 0,105 \text{ м}$  ( $r_0 = 0,078, r_1 = 0,163 \text{ м}$ );

- межтарелочное расстояние –  $h = 7 \times 10^{-4}$  м;
- угловая скорость ротора  $\omega = 650 \text{ с}^{-1}$  (рис. 21) .

Параметры суспензии:

- динамическая вязкость жидкости  $\mu = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;
- плотность, соответственно, жидкости  $\rho = 1450$ , твердого  $\rho_1 = 1560 \text{ кг/м}^3$ ;

концентрация твердой фазы  $c = 0,1$ ;

- размер пробных частиц  $\delta_1 = 2 \times 10^{-5}$ ,  $\delta_2 = 3 \times 10^{-5}$  м.

Принцип действия сепаратора основан на том, что по центральному каналу в тарелкодержатель подается суспензия, которая затем поступает в пространство между кромками пакета тарелок и барабаном (шламовое пространство). Далее она попадает в межтарелочное пространство и по зазору между тарелкодержателем и верхними кромками тарелок поднимается вверх, после чего через прорезь выходит из барабана (рис. 17) [9]. Таким образом, при разделении суспензии фракция частиц с требуемым размерным диапазоном выводится из барабана сепаратора, тогда как фракция с размерами больше требуемого диапазона накапливается в барабане и периодически разгружается.

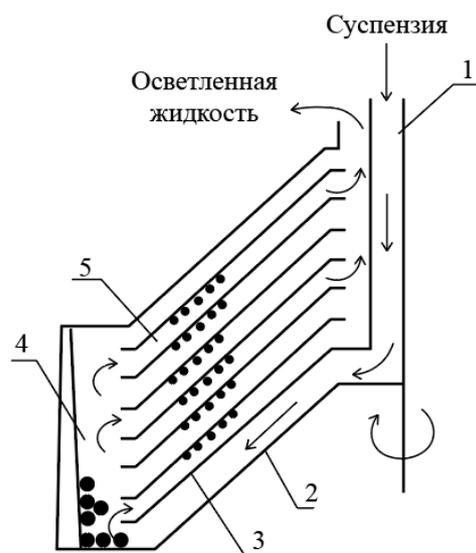


Рисунок 17 - Принцип работы сепаратора: 1 – центральный канал; 2 – барабан сепаратора; 3 – пакет тарелок; 4 – шламовое пространство; 5 – межтарелочное пространство

В ходе экспериментальных исследований было выдвинуто предположение, что маточный утфель (суспензия) с объемной концентрацией  $c$  твердого и заданной  $f(\delta)$  плотностью распределения твердой фазы по крупности равномерно перемешан, причем плотность  $\rho_1$  твердой фазы превышает плотность  $\rho$  жидкости.

Требуется, обрабатывая маточный утфель в сепарирующей машине, выделить из него частицы размером  $\delta \in (\delta_1, \delta_2)$ , (где  $\delta_1, \delta_2$  – соответственно, наименьший и наибольший диаметр частиц).

В основу математического моделирования процесса сепарирования было положено используемое в теории разделения гетерогенных жидкостных систем научные положения о движущейся по заданной траектории частицы с так называемым  $\delta_{кр}$  критическим диаметром, значениях коэффициентов осветления  $\eta$  и уноса  $\varepsilon$ .

Физический смысл понятия «критический диаметр» заключается в том, что в условиях осаждения твердой фазы в жидкостной системе частицы размером, превышающем  $\delta$ , при движении более крупных частиц

по наиболее удаленной (и поэтому, наименее выгодной) траектории в рабочем объеме машины осаждаются раньше, чем частицы размером не более, чем  $\delta < \delta_k$  (траектория  $MN$  частицы диаметром  $\delta_k$ , рис. 18).

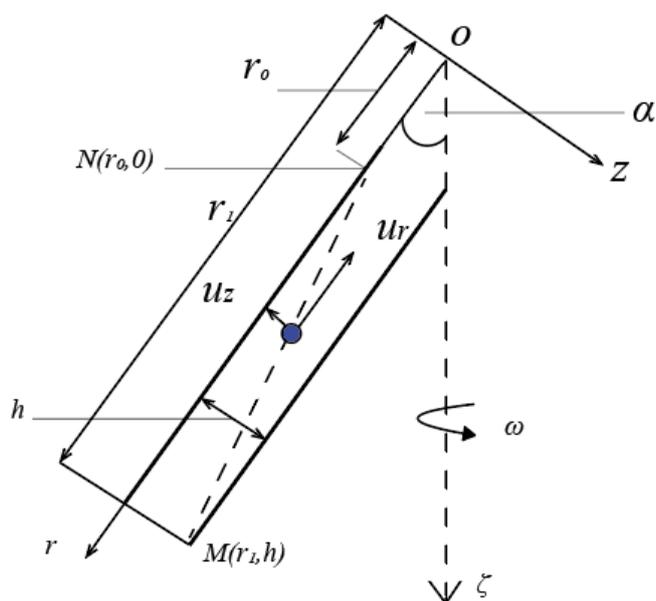


Рисунок 18 – Схема к обоснованию расчета траектории частицы критическим диаметром:  $O$  – начало отсчета биконических координат;  $r$  – продольная биконическая координата;  $z$  – поперечная продольная координата;  $\alpha$  – полуугол конусности;  $\omega$  – угловая скорость;  $\zeta$  – ось вращения;  $r_0$  – минимальный продольный размер;  $r_l$  – максимальный продольный размер;  $h$  – межтарелочный зазор;  $MN$  – траектория движения частицы;  $u_z$  – поперечная составляющая скорости;  $u_r$  – продольная составляющая скорости

Знание этих данных позволяет создать предпосылки для организации режима работы сепаратора таким образом, чтобы была обеспечена, в основном, аккумуляция в осадке частиц размером  $\delta \in (\delta_1, \delta_2)$ . Для чего в соответствии со значениями  $\delta_1$  и  $\delta_2$  границ целевой области рассматриваются две альтернативные стратегии проведения расчета процесса фракционирования, среди которых, по результатам расчета, выбирается наиболее предпочтительная.

Если в качестве параметра управления процесса принимается расход  $q$  суспензии, то формула расчета зависящего от координат  $z$  на входе в межтарелочный зазор (МТЗ) критического (текущего) диаметра  $\delta(z)$  частицы имеет вид

$$\delta(z) = (1 - c)^{-2} \sqrt{\frac{qz}{kh}}, \quad (19)$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  по формуле

$$k = \frac{\pi\omega^2(R_2^3 - R_1^3)\Delta \sin\alpha \cos\alpha}{27\mu}, \quad (20)$$

$c$  – счетная концентрация твердой фазы суспензии;  $q = Q/[(Z - 1) \cdot 3600]$ ;  $Q, Z$  – соответственно, производительность сепаратора и количество вставок в пакете тарелок;  $\omega$  – угловая скорость ротора;  $R_1, R_2$  – соответственно, минимальный и максимальный продольный размер тарелки;  $\Delta = \rho_1 - \rho > 0$ ;  $\alpha$  – полуугол конусности тарелки;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости,  $h$  – межтарелочное расстояние.

В условиях, когда  $z = h$  формула (19) вырождается в

$$\delta_{\text{гл}} = (1 - c)^{-2} \sqrt{\frac{q}{k}}, \quad (21)$$

где  $\delta_{\text{гл}}$  – имеющее в теории седиментации ключевое значение понятие «глобальный критический диаметр», которое состоит в том, что, согласно определению, в процессе разделения гетерогенной жидкостной системы из различающихся по плотности фаз (суспензии, эмульсии) ее твердая фаза, включающая частицы размером не менее чем  $\delta$ , полностью уходит в осадок (вместе с некоторой долей частиц меньшим размером).

Если  $\Phi(\delta) = 1 - F(\delta)$  – счетная характеристическая функция (ХФ),  $F(\delta) = n(\delta)/n_0$  – счетная функция распределения (ФР) частиц;  $n(\delta), n_0$  – соответственно, число частиц размером не превышающем  $\delta$  в исходном объеме суспензии, число частиц в том же объеме, то при обосновании эффективности процесса разделения исходят из формулы расчета коэффициента осветления [181].

$$\eta = \frac{1}{h} \int_0^k \Phi(\delta(z)) dz, \quad (22)$$

где  $\eta$  – отношение количества осажденных на поверхности тарелки частиц к содержанию их в исходной жидкостной системе,  $h$  – толщина межтарелочного зазора,  $\delta(z)$  вычисляется по (29).

Формулы (19)–(21) используются для численного анализа процесса фракционирования порошкообразной субстанции в тарельчатом сепараторе-осветлителе.

Если инициируется процесс фракционирования по размеру частиц порошка  $\delta \in (\delta_1, \delta_2)$ , (где  $\delta_1, \delta_2$  – соответственно, наименьший и наибольший диаметр частиц порошка), то в таком случае согласно положениям методики поступают в соответствии с выбором альтернативной стратегии из двух приведенных ниже.

*I-ая стратегия. Нулевой этап I-ой стратегии.* В качестве пробных параметров процесса выбирают, последовательно,  $\delta_2$  и  $\delta_1$ . Эти значения параметров процесса (например,  $q$  или  $\omega$ ) принимают в качестве заданных глобальных критических диаметров, сначала

$$\delta_{гп2} = \delta_2, \quad (23)$$

а затем

$$\delta_{гп1} = \delta_1. \quad (24)$$

Если в качестве параметра управления процесса выбран расход жидкости  $q$ , то на базе формул (20), (21), (23), (24) имеют

$$q_1 = k(1 - c)^4 \delta_2^2, \quad (25)$$

$$q_2 = k(1 - c)^4 \delta_1^2. \quad (26)$$

После чего найденное по (25) значение  $q_1$  подставляют в (21), а рассчитанное значение  $\delta(z)$  – в (22). Причем согласно расчету полученный коэффициент осветления дает относительное количество отошедших полностью в осадок частиц размером не менее чем  $\delta_2$ , вместе с небольшой долей частиц меньшим размером и перемещающихся по более короткому

пути по сравнению с длиной  $MN$  пути частицы с глобальным диаметром  $\delta_{гл2}$  (рис. 17).

Значение коэффициента осветления на нулевом этапе процесса фракционирования вычисляется в виде

$$\eta_0 = \frac{1}{h} \int_0^k \Phi_0(\delta(z)) dz, \quad (27)$$

где  $\Phi_0$  – ХФ распределения частиц порошка в исходной жидкостной системе,  $\delta(z)$  задано по (19),  $q_1$  – по (25).

В условиях проведения опыта с расходом  $q_1$  образовавшийся в результате осадок с частицами в количестве  $n_1 = n_0 \eta_0$  (где  $n_0$  – количество частиц в исходной суспензии,  $\eta_0$  определяемый по (27) коэффициент осветления) удаляют из рабочего объема машины для утилизации или последующей переработки.

При этом относительное количество частиц в фильтрате по сравнению к содержанию их в исходной суспензии снизилось до

$$\frac{(n_0 - n_1)}{n_0} = (1 - \eta_0) = \varepsilon_1 \quad (28)$$

$\varepsilon_1$  – коэффициента уноса – удельное (по отношению к исходному) счетное содержание частиц твердой фазы в фильтрате.

*Первый этап I-ой стратегии.* На первом этапе I-ой стратегии при расходе  $q = q_2$  осветленной и предварительно перемешанной суспензии (фильтрате), с новой характеристической функцией  $\Phi_1(\delta)$  распределения твердой фазы выполненная на первом этапе процедура повторяется с расчетом коэффициента осветления  $\eta_2$  по формуле

$$\eta_2 = \frac{n_2}{n_0 \varepsilon_1} = \frac{1}{h} \int_0^k \Phi_1(\delta(z)) dz, \quad (29)$$

где  $n_2$  – число отошедших в осадок частиц размером  $\delta_1 < \delta < \delta_2$  (вместе с некоторой долей частиц размером меньшим  $\delta_1$ ),  $\varepsilon_1 = 1 - \eta_1$  – определяется по (28),  $\Phi_1(\delta)$  – ХФ распределения частиц в фильтрате.

По своему смыслу коэффициент осветления  $\eta_2$  определяет относительное (в долях к количеству  $(n_0 - n_1) = n_0 \varepsilon_1$ ) число частиц, принадлежащих целевому интервалу  $\delta \in (\delta_1, \delta_2)$ .

По окончании процесса обработки суспензии получающуюся при этом субстанцию используют в качестве затравочного материала или повторно обрабатывают.

*II-ая стратегия. Нулевой этап II-ой стратегии* (обозначения функций  $\Phi$  и  $F$ , параметров  $\eta$  и  $\varepsilon$ , для простоты, принимаются такими же, как и для *I-ой стратегии*). В качестве пробных параметров процесса выбирают, последовательно,  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , в качестве заданных глобальных критических диаметров сначала принимают

$$\delta_{гл1} = \delta_1, \quad (30)$$

а затем

$$\delta_{гл2} = \delta_2. \quad (31)$$

По аналогии с (25), (26) в качестве параметров управления процесса, сначала (29)

$$q_1 = k(1 - c)^4 \delta_1^2, \quad (32)$$

а затем, согласно (32)

$$q_2 = k(1 - c)^4 \delta_2^2. \quad (33)$$

После чего определенное по (32) значение  $q_1$  подставляют в (19), а рассчитанное значение  $\delta(z)$  – в (22). Причем согласно расчету полученное выражение коэффициента осветления дает относительное количество отошедших полностью в осадок частиц размером не менее чем  $\delta_1$ .

Значение коэффициента осветления вычисляется в виде

$$\eta_0 = \frac{1}{h} \int_0^k \Phi_0(\delta(z)) dz, \quad (34)$$

где  $\Phi_0$  – характеристическая функция распределения твердой фазы в исходной жидкостной системе,  $\delta(z)$  рассчитывается по (19),  $q_1$  – по (32).

В условиях проведения опыта с расходом  $q_1$  на нулевом этапе образовавшийся в результате обработки осадок с частицами в количестве

$n_1 = n_0\eta_0$  (где  $n_0$  – количество частиц в исходной суспензии,  $\eta_0$  определяется по (32)) сохраняют, разбавляя затем его на первом этапе утфелем или иной нейтральной жидкостью до исходной концентрации. Осветленную суспензию удаляют.

*Первый этап II-ой стратегии.* На первом этапе обработки при расходе  $q = q_2$ , обогащая разбавленную суспензию полученным на нулевом этапе осадком, выполненная на предыдущем этапе процедура повторяется, коэффициент осветления

$$\eta_2 = \frac{n_2}{n_0\varepsilon_1} = \frac{1}{h} \int_0^k \Phi_1(\delta(z)) dz, \quad (34)$$

где  $n_2$  – число отошедших в осадок частиц размером  $\delta_1 < \delta < \delta_2$ ,

$\Phi_1(\delta)$  – характеристическая функция распределения частиц в разбавленном утфелем сохраненного после нулевого этапа обработки осадка.

Получившуюся массу используют в качестве затравочного материала или повторно обрабатывают.

Сопоставляя результаты проведенного расчета по обеим стратегиям, выбирают среди них наиболее предпочтительную, например, соответствующую минимальному числу этапов проведения процесса фракционирования.

В том случае, если требуется провести более строгое фракционирование, то после выполнения первого этапа его каждый раз, с новой характеристической функцией, повторяют необходимое число итераций фракционирования.

На рис.19 отражены плотности распределения твердой фазы.

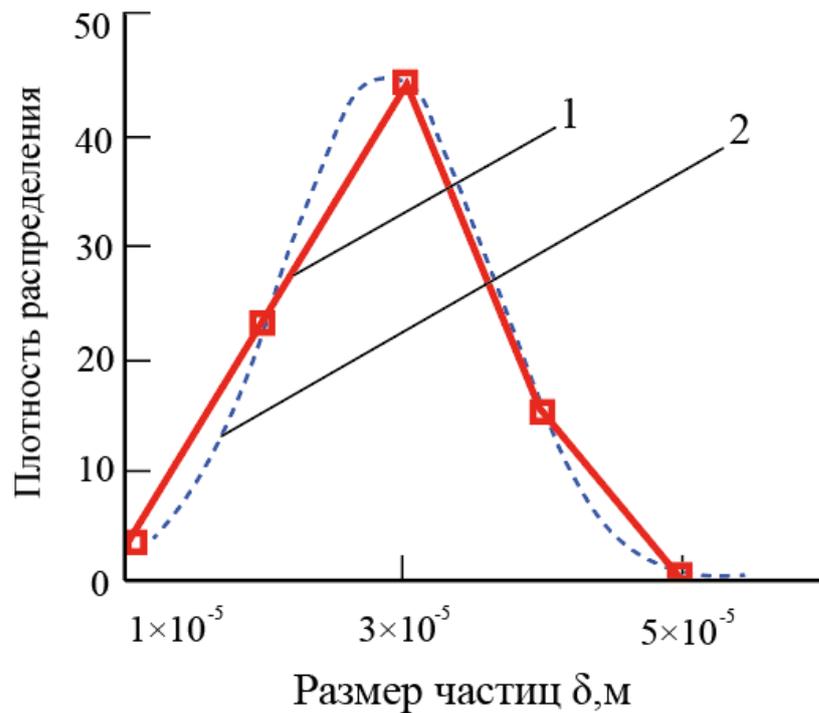


Рисунок 19 – Плотность  $f(\delta)$  распределения твердой фаз суспензии при измельчении на шаровой мельнице (1 – опытная кривая, 2 – аппроксимационная кривая)

В основу расчета по функции распределения  $F$  (и соответствующей  $F$  характеристической функции  $\Phi$ ) как интегральной зависимости от плотности распределения  $f$  были выбраны данные рис. 19, отраженные кривой 1 функции распределения  $F_0$ ) и кривой 4 (характеристическая функция  $\Phi_0$ ), а также аналогичные им зависимости  $F_1$  и  $\Phi_1$ , соответственно, в виде кривых 2, 5 для фильтра, 3 и 6 на рис. 20.

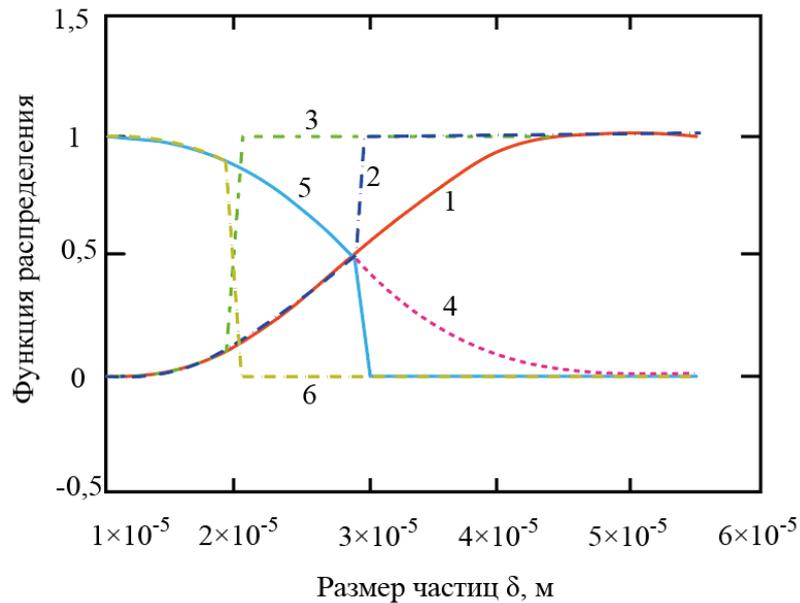


Рисунок 20 – Интегральные зависимости счетного распределения частиц по крупности согласно I-ой стратегии (функция распределения: 1 – исходное распределение (нулевой этап), 2 – распределение в фильтрате, 1-ый этап, 3 – распределение в фильтрате, 2-ой этап; характеристическая функция: 4 – исходное распределение (нулевой этап), 5 – распределение в фильтрате, 1-ый этап, 6 – распределение в фильтрате, 2-ой этап)

Пользуясь свойством функции распределения рассчитывается относительное число  $\Delta n/n_0$  частиц размером  $\delta \in (\delta_1, \delta_2)$

$$\Delta n/n_0 = F_0(\delta_2) - F_0(\delta_1) = 0,444. \quad (35)$$

Согласно предложенной методике режим работы сепаратора предварительно настраивается на определяемую по (24) производительность  $q_1$  (производительность сепаратора  $Q = 7,36 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), что, при обработке суспензии обеспечивало осаждение на нулевом этапе процесса разделения частиц размером больше  $\delta_2$ . Определяя коэффициент осветления  $\eta$  в соответствии с (19), пользуются зависимостью

$$\eta_0 = \frac{1}{h} \int_0^k \Phi_0(\delta(z)) dz = \frac{1}{h} \int_0^k \Phi_0[\delta_2 * (\frac{z}{h})^{\frac{1}{2}}] dz, \quad (36)$$

где в определяемой по (19) формуле  $\delta(z)$  полагают  $q = q_1$ .

В соответствии с (27), (28) коэффициент уноса  $\varepsilon_1 = 0,204$ , коэффициент осветления  $\eta_1 = 0,796$ . В свою очередь, при обработке фильтрата в выражении для  $\delta(z)$  согласно (26) принимают  $q = q_2$  (производительность сепаратора  $Q = 3,27 \text{ м}^3/\text{ч}$ ),  $\delta = \delta_1$ , коэффициент осветления  $\eta$  определяют по формуле (27).

При этом, поскольку согласно смыслу глобального критического диаметра, в фильтрате отсутствуют частицы размером  $\delta \geq 3 \times 10^{-5} \text{ м}$ , то с небольшой погрешностью функции распределения для фильтрата выбиралась в виде

$$F_1(\delta) = \begin{cases} F_0(\delta) & \text{при } \delta < 3 \times 10^{-5}, \\ 1 & \text{при } \delta \geq 3 \times 10^{-5} \text{ м}, \end{cases} \quad (37)$$

где  $F_0(\delta)$  представляется кривой 1 рис. 20, соответствующая ей характеристическая функция  $\Phi_0(\delta)$  – кривой 4 рис. 20. Аналогично, данные для фильтрата – на основе определяемой по (37) функции распределения  $F_1(\delta)$  и характеристической функции  $\Phi_1(\delta)$ , показанной кривыми 2 и 5 рис. 20.

Причем, по аналогии с (37) получено

$$\Delta n_{11}/n_1 = F_1(\delta_2) - F_1(\delta_1) = 0,444.$$

С целью дальнейшего уточнения результатов расчета фильтрат, симулируя, подвергали повторной обработке уже с функцией распределения

$$F_2(\delta) = \begin{cases} F_1(\delta) & \text{при } \delta < 2 \times 10^{-5}, \\ 1 & \text{при } \delta \geq 2 \times 10^{-5} \text{ м}, \end{cases} \quad (38)$$

где  $F_1(\delta)$ , заданная по (36), представлена кривой 2 рис. 20.

При этом имели

$$\Delta n_{12}/n_2 = F_2(\delta_2) - F_2(\delta_1) = 0,877,$$

где  $F_2(\delta)$  определяли согласно (38) кривой 3 рис. 20.

Как видно, согласно расчету, в результате двукратной обработки фильтрата, содержание твердой фазы в осадке с частицами размером  $\delta$

$\in (\delta_1, \delta_2)$ , равномерно распределенных в исходной суспензии, возросло с 44,4% до сконцентрированных 87,7 % (с некоторой долей более мелкой фракции в осадке фильтрата).

Поскольку проведенное аналогичным образом имитационное моделирование процесса фракционирования по **II**-ой стратегии выявило улучшение очистки целевой фракции с 44,4 % до 87,7 % уже на первом этапе процесса фракционирования, то отсюда пришли к заключению о предпочтительности использования при моделировании этого процесса именно этой стратегии (рис.21).

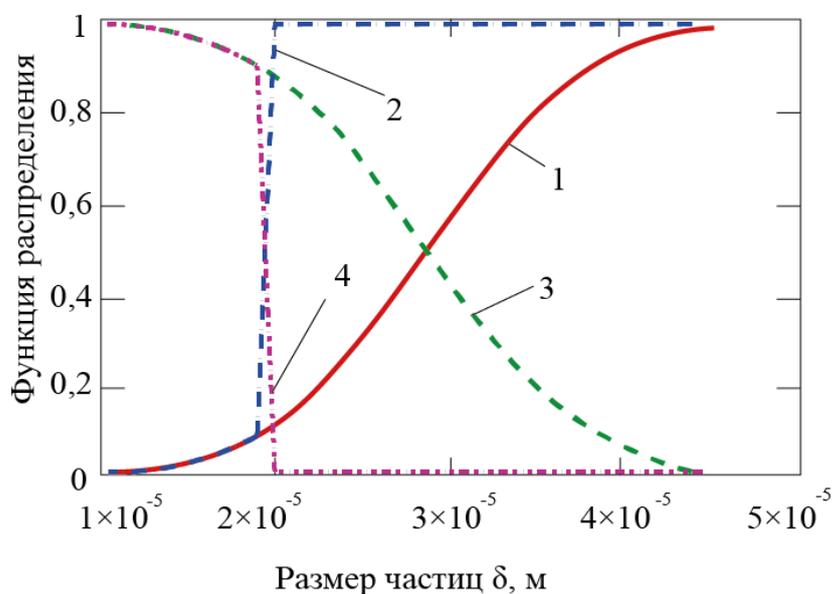


Рисунок 21 – Интегральные зависимости счетного распределения частиц по крупности согласно **II**-ой стратегии (функция распределения:

1 – исходное распределение (нулевой этап), 2 – распределение в фильтрате, 1-ый этап; характеристическая функция: 3 – исходное распределение (нулевой этап), 1-ый этап, 4 – распределение в фильтрате)

Технология поэтапного разделения однородной по составу взвешенной в жидкости твердой фазы может быть эффективно применена для реализации процесса фракционирования частиц в МТЗ барабана центробежного сепаратора. Для численного исследования используются данные по

гранулометрическому составу порошка, а также вытекающие из особенностей кинематики частицы в межтарелочном потоке характеристик дисперсности взвеси. Полученные результаты расчета могут быть эффективно использованы при обосновании процесса фракционирования сыпучих материалов на базе сепарирующей центробежной машины.

#### **4.2. Применение сепарирования для формирования центров кристаллизации**

Результаты математического моделирования процесса сепарирования маточного утфеля в межтарелочном пространстве барабана сепаратора способствовали уточнению технологических условий и параметров приготовления затравочных центров кристаллизации.

В основу разработки усовершенствованного способа подготовки затравочных кристаллов была положена технология [81], которая включает в себя разделение насыщенного сахаросодержащего раствора на две части. Одну часть раствора охлаждают до 40–50°C под разрежением. Охлаждение проводят до образования в отобранной части 40–50% кристаллов. Для достижения однородности затравочных кристаллов данный способ предусматривает фракционирование этих двух частей температурой 80–85°C в центрифугах до содержания в жидкой фазе кристаллов сахара размером 50–80 мкм. Затем их смешивают, а содержащиеся в них кристаллы наращивают при снижении температуры до 70–74°C. При этом размеры наращиваемых кристаллов выдерживают в диапазоне 120–150 мкм и содержания в суспензии в диапазоне 20–30%.

Эксперименты позволили установить, что при использовании затравочных кристаллов, произведенных по этой технологии, сложно обеспечить высокую однородность кристаллов белого сахара. Это вызвано тем, что фракционирование полидисперсных суспензий в центрифугах не позволяет с высокой точностью получить затравочные кристаллы требуемого размера.

При разработке нового способа повышенное внимание было уделено решению проблем обеспечения однородности центров кристаллизации и их размерным диапазоном.

Экспериментальные исследования в этом направлении позволили также уточнить технологические параметры процесса формирования затравочных центров, их размерный диапазон и содержание в маточном утфеле. Полученные данные были использованы при разработке нового способа получения затравочных кристаллов сахарозы [93].

В соответствии с предлагаемой технологией насыщенный сахаросодержащий раствор делят на две равные части. Одну часть охлаждают до температуры 35–45°C под разряжением.

Отобранную охлажденную часть сиропа, содержащую 20–30% кристаллов, смешивают со второй частью до достижения температуры смеси 80–85°C, после чего полученную суспензию фракционируют методом сепарирования в жидкостном сепараторе-очистителе марки АІ ОЦМ-5 с оставлением в жидкой фазе кристаллов сахара размером 0,05–0,10 мм.

Для улучшения реологических характеристик затравочной суспензии в разработанном способе предусматривается обогащение раствора моноглицеридом дистиллированным в количестве 0,0005–0,001% к массе затравочной суспензии. Дальнейшее наращивание кристаллов проводят при снижении температуры до 70–73°C. При этом размеры кристаллов выдерживают в размерном диапазоне 0,15–0,20 мм и содержании в суспензии в пределах 45–50%.

Проводят повторное фракционирование кристаллов размером 0,12–0,20 мм. Таким образом, содержание кристаллов в жидкой фазе достигает 35–45%, а их размер составляет 0,15–0,18 мм.

Проверку усовершенствованной технологии получения затравочной суспензии осуществляли на АО «Сахарный комбинат «Отрадинский».

Полученная затравочная суспензия была использована при уваривании утфеля І кристаллизации. Сравнение качественных характеристик утфеля,

полученного с использованием предлагаемого способа получения затравочной суспензии и известного, представлено в табл.15.

Таблица 15 - Сравнительный анализ характеристик утфеля I кристаллизации с использованием затравочных суспензий

Показатели процесса получения белого сахара	С использованием затравочной суспензии:	
	По предлагаемому способу	По известному способу
Чистота утфеля, %		
в первом вакуум-аппарате	91,80	92,50
во втором вакуум-аппарате	91,65	92,00
Содержание сухих веществ, %		
в первом вакуум-аппарате	92,00	92,30
во втором вакуум-аппарате	92,75	93,00
Выход кристаллов сахара из центрифуги, %	49,1	48,5
Физико-химические показатели белого сахара:		
цветность, ед. опт. плотности	95	104
Зола, %	0,015	0,03
Редуцирующие вещества, %	0,02	0,04
Гранулометрический состав:		
Ср, мм	0,75	0,45
К <sub>н</sub> , %	22,5	24,2

Из табл. 15 видно, что разработанная технология позволяет добиться увеличения процентного содержания кристаллов в утфеле примерно на 0,6%, причем удалось существенно улучшить гранулометрические характеристики утфеля. Так, средний размер кристаллов (Ср) полученного с использованием новой затравочной суспензии утфеля, больше чем по известной на 0,3 мм, а коэффициент неоднородности (К<sub>н</sub>) снизился на 1,7%.

### 4.3. Усовершенствование технологии уваривания утфеля I кристаллизации

В результате проведенных исследований были сформулированы условия повышения качественных показателей сахара, конкретизированы некоторые технологические параметры и разработан новый способ производства кристаллического белого сахара (Патент № 2763788 С1) [87]. При этом особое внимание было уделено вопросам повышения однородности затравочных кристаллов, что в значительной степени неразрывно связано с этапами формирования и роста центров кристаллизации в производственных сахаросодержащих растворах.

Важнейшим условием реализации нового способа является использование для заводки ЦК образованных самопроизвольно по Брауншвейгскому методу кристаллов [155]. Проведенные эксперименты позволили выявить, что при использовании центров кристаллизации, образованных именно по Брауншвейгскому методу, достигаются лучшие результаты по увариванию утфеля. Это может быть объяснено тем, что данный способ заводки позволяет обеспечить высокую однородность кристаллов сахара и сделать их состав стабильно равномерным. Помимо этого, истощение межкристального раствора при использовании данного метода для заводки центров кристаллизации протекает более глубоко, что соответственно способствует повышению выхода кристаллов сахара. Основным отличием предложенной технологии от известной является то, что предварительно перед проведением процедуры заводки центров кристаллизации в вакуум-аппарате подготовленную затравку подвергают процедуре фракционирования методом сепарирования в сепараторе до достижения размерного диапазона кристаллов 0,12–0,16 мм [72]. На рис. 22 представлена аппаратная схема реализации предложенного способа.

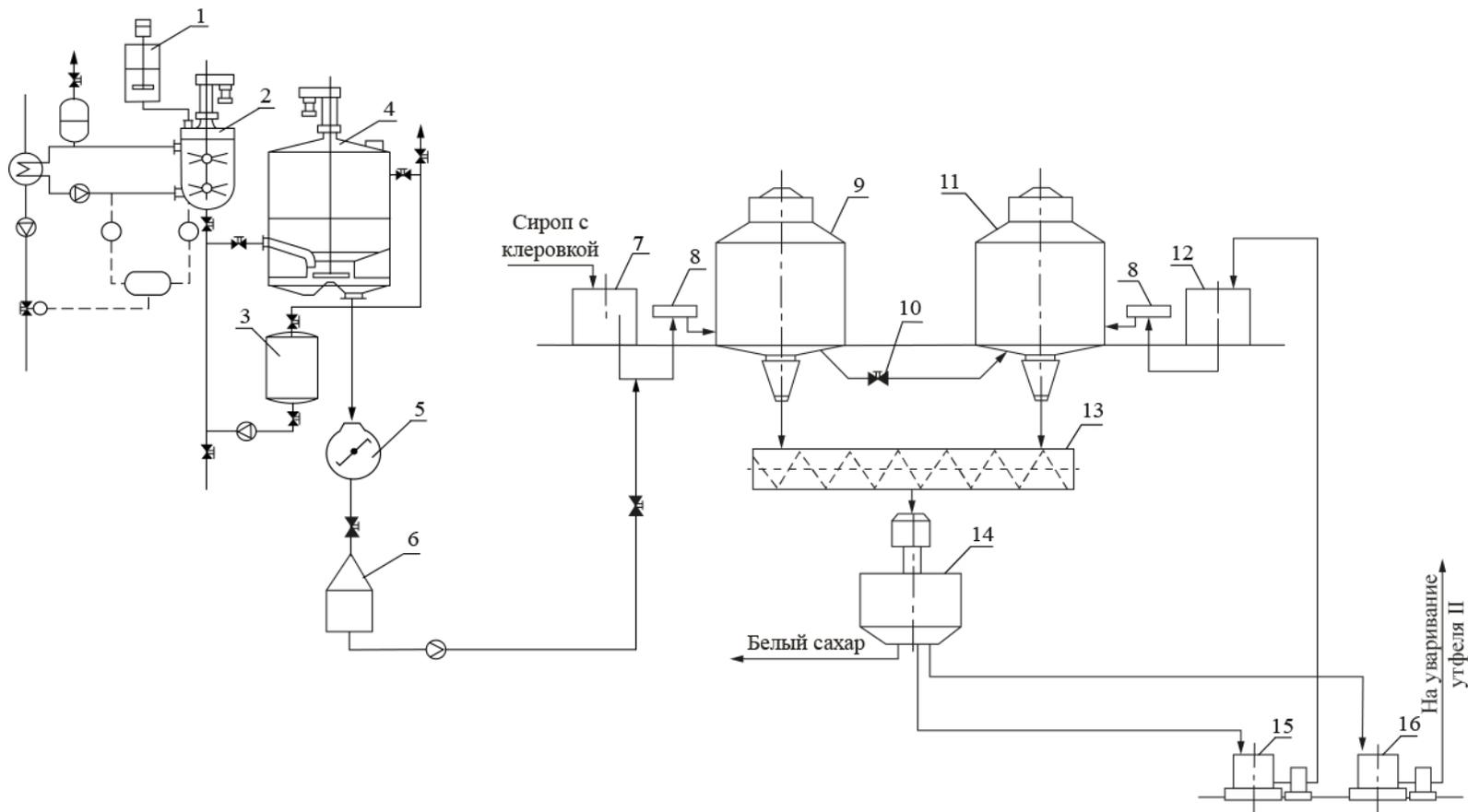


Рисунок 22 - Схема реализации способа по Пат. 2763788: 1 - резервуар с затравочной пастой, 2 - кристаллизатор-охладитель, 3 - приёмник сиропа, 4 – вакуум-аппарат для получения маточного utfеля, 5 - резервуары затравочной суспензии, 6 – центробежный сепаратор, 7 – сборник сиропа, 8 - коллектор, 9 – вакуум-аппарат, 10 - вентиль, 11 – вакуум-аппарат, 12 – сборник второго оттока, 13 - utfелемешалка, 14 - центрифуга, 15 – сборник второго оттока после центрифуги, 16 – сборник первого оттока после центрифуг

Реализация усовершенствованного способа потребовала использования дополнительного оборудования (сепаратора марки АІ-ОЦМ-5) и монтажных работ для его включения в технологическую схему.

Результаты ранее проведенных исследований и математического моделирования процесса сепарирования позволили уточнить требования к размерному диапазону центров кристаллизации и установить, что при введении в сироп центров кристаллизации размером 0,12–0,16 мм достигаются лучшие результаты уваривания утфеля. При этих условиях не снижается скорость роста кристаллов, а также устраняется риск срастания кристаллов.

В процессе уваривания введенные кристаллы наращивают до 0,2–0,3 мм, соблюдая при этом интервал пересыщения в диапазоне 1,12–1,17. Было установлено, что при запредельных значениях пересыщения, т.е. менее 1,12 или более 1,17, ухудшаются условия роста уже образованных в вакуум-аппарате центров кристаллизации.

С целью сокращения времени процесса уваривания и обеспечения более высокого выхода сахара дальнейшие эксперименты были направлены на отработку отбора части утфеля из одного вакуум-аппарата во второй. Предложенный способ предусматривает отбор 30–40% утфеля в качестве кристаллической основы, которую затем в смеси с сиропом и клеровкой подают до закрытия поверхности нагрева паровой камеры второго вакуум-аппарата.

Опыты по отбору части утфеля из первого ВА показали, что количество отбираемого утфеля должно находиться в диапазоне 30–40% от общей массы утфеля. Также установлено, что при нарушении данного диапазона ухудшаются условия уваривания утфеля в первом ВА, следовательно, снижается выход сахара и его качественные характеристики.

Дальнейшее уваривание утфеля во втором вакуум-аппарате проводили на подкачках смеси сиропа с клеровкой до содержания в нем 92,0–92,5% сухих веществ. Данный диапазоны установлены опытным путем. При

содержании сухих веществ менее 92,5% ухудшается истощение межкристального раствора, а при содержании выше 92,5% ухудшаются условия спуска, уваренного утфеля из вакуум-аппарата и его разделения в центрифуге.

С целью повышения выхода сахара при выдерживании требуемых показателей качества белого сахара оставшуюся после отбора часть утфеля в первом вакуум-аппарате раскачивают сиропом с клеровкой и уваривают при пересыщении 1,12–1,15 до содержания в нем 92,0–92,5% сухих веществ. Результаты эксперимента показали, что раскачивание утфеля смесью сиропа с клеровкой позволяет обеспечить оптимальные реологические характеристики увариваемого утфеля, а именно снизить его вязкость и растворить «муку» – очень мелкие кристаллы сахара. Также выдерживание интервала пересыщения в диапазоне 1,12–1,15 позволяет создать требуемые условия роста ранее образованных центров кристаллизации.

На завершающем этапе уваривания утфеля I кристаллизации готовят к выгрузке первый и второй вакуум-аппарат. Утфель спускают в приемную утфелемешалку, причем сначала проводят спуск из первого аппарата. Затем их разделяют в фильтрующей центрифуге на кристаллический белый сахар, первый и второй оттеки.

Для сопоставления предложенной технологии и известной в утфеле I кристаллизации определяли следующие показатели: чистота утфеля в первом и втором аппарате, содержание сухих веществ в двух аппаратах, выход сахара из центрифуг. Также была определена цветность, содержание золы, редуцирующих веществ и гранулометрический состав кристаллического белого сахара (средний размер и коэффициент неоднородности). Сопоставление полученных результатов по предложенному и известному способу представлено в табл. 16.

Таблица 16 – Сопоставление предлагаемого и известного способа

Показатели процесса получения белого сахара	Технология получения	
	Предлагаемый способ	Известный способ
Чистота утфеля, %:		
в первом вакуум-аппарате	92,00	92,05
во втором вакуум-аппарате	91,80	91,90
Содержание сухих веществ, %:		
в первом вакуум-аппарате	92,10	92,15
во втором вакуум-аппарате	92,00	92,20
Выход кристаллов сахара из центрифуги, % к массе утфеля	49,40	48,75
Физико-химические показатели качества белого сахара:		
цветность, ед. опт. пл.	99,0	104,0
Зола, %	0,027	0,003
Редуцирующие вещества, %	0,07	0,04
Гранулометрический состав:		
С <sub>р</sub> , мм	0,81	0,72
К <sub>н</sub> , %	22,00	24,00

Из приведенных в табл.16 данных видно, что по сравнению с известной технологией, предложенный способ уваривания позволяет увеличить выход сахара из центрифуг на 0,65%, при этом он обеспечивает достижение более высоких качественных показателей кристаллического белого сахара. Поскольку при разработке нового способа особое внимание было уделено процессу формирования однородных центров кристаллизации, предложенный способ позволяет улучшить гранулометрические показатели качества белого сахара. В частности, увеличить средний размер кристаллов и снизить коэффициент неоднородности.

Таким образом, результаты исследований в этом направлении позволили сформулировать условия обеспечения однородности вводимых в пересыщенный сироп центров кристаллизации и на основе этих данных разработать усовершенствованный подход к заводке центров кристаллизации, позволяющий повысить выход сахара требуемого качества.

## **ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ САХАРОЗЫ**

### **5.1. Разработка комплексной технологии уваривания утфеля I кристаллизации**

Получение утфеля I кристаллизации по типовой технологии состоит из следующих основных операций: выпаривание влаги из сиропа с клеровкой до коэффициента пересыщения 1,25–1,30; введение в пересыщенный сахаросодержащий раствор центров кристаллизации; закрепление и рост центров кристаллизации до требуемых размерных значений; доведение содержания сухих веществ в утфеле до 92,0–92,5%; выгрузка утфеля I кристаллизации из вакуум-аппарата [113].

При проведении исследований по разработке комплексной технологии уваривания утфеля I кристаллизации были поставлены эксперименты по отработке отдельных способов уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации. Кроме того, проведены экспериментальные исследования комбинирования этих инновационных разработок в области уваривания и центрифугирования утфеля для условий переработки сырья различного качества.

Экспериментальные исследования в этом направлении осуществлялись в условиях АО «Отрадинский сахарный комбинат». Отличительной особенностью разработанной технологии является то, что в ее основу были положены инновационные способы уваривания и центрифугирования сахарного утфеля (Пат.№ 2763788, № 2771069, №2757119, № 2795978 №2759120, №2771068, №2758295).

В процессе экспериментальных исследований были уточнены отдельные элементы технологии уваривания утфеля I кристаллизации:

- отбор части утфеля I кристаллизации и ее разделение в центрифуге;
- уваривание в двух вакуум-аппаратах на предварительно сформированной в одном из них кристаллической основе;

- использование с целью изменения реологических характеристик утфеля пищевых поверхностно-активных веществ (ПАВ);
- применение химических агентов при уваривании и центрифугирования утфеля I кристаллизации.

Особое внимание было уделено уточнению условий проведения процесса формирования центров кристаллизации и их дальнейшего наращивания:

- требования к количеству центров кристаллизации и условиям их закладки;
- условия сепарирования затравочных центров кристаллизации до заданных размерных значений в центробежном сепараторе;
- процентное содержание кристаллов в утфеле и условия обеспечения максимальной скорости кристаллизации;
- условия предотвращения вторичного зародышеобразования и срастания кристаллов в процессе уваривания утфеля I кристаллизации;
- выдерживание расстояния между кристаллами в процессе уваривания утфеля I кристаллизации;
- условия формирования кристаллической основы и ее перераспределение между двумя вакуум-аппаратами.

Результаты производственных экспериментов позволили сформулировать и уточнить требования к комплексной технологии уваривания утфеля.

Комплексная технология включает в себя ряд инновационных подходов, которые позволяют повысить эффективность уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации по сравнению с типовой технологией (рис.23).

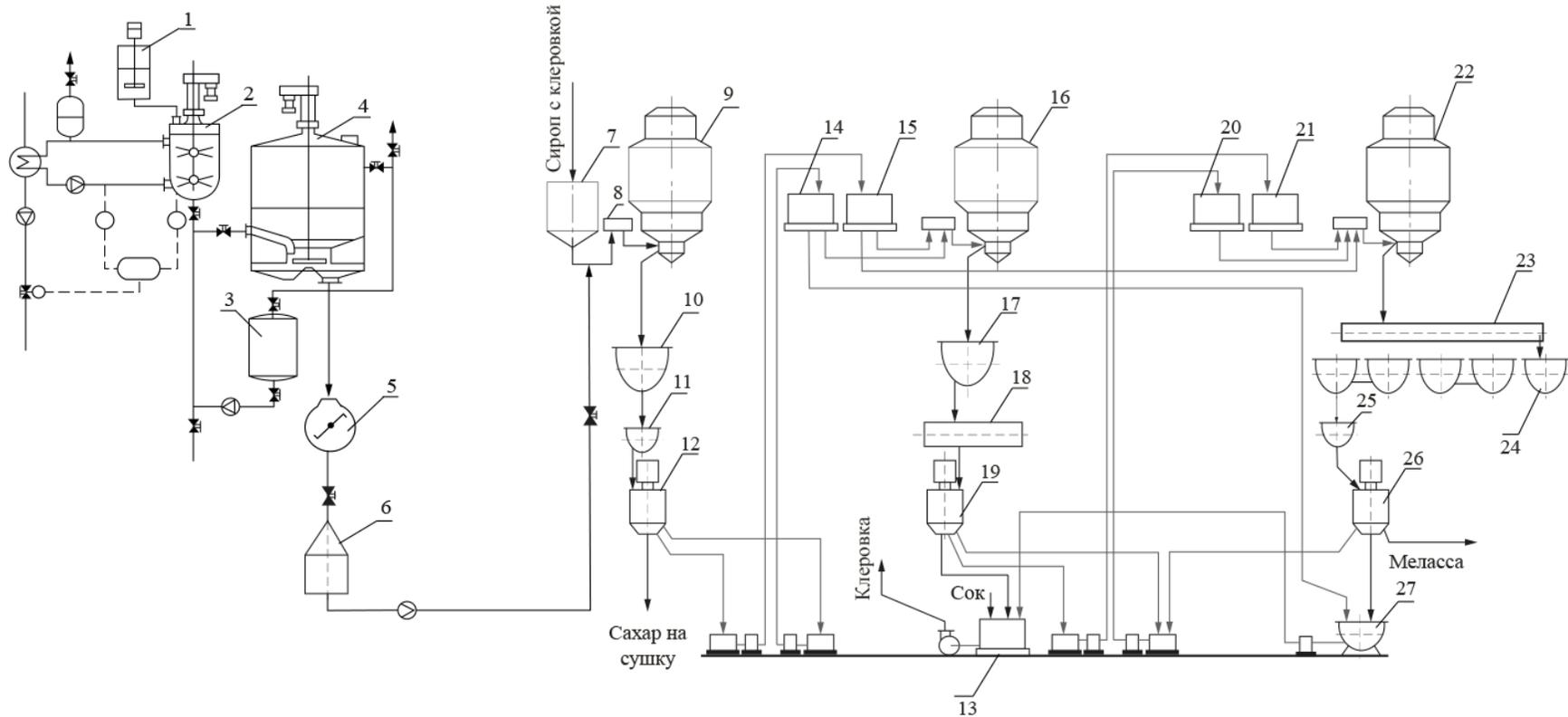


Рисунок 23 - Предлагаемая схема комплексной технологии: – 1 - резервуар с затравочной пастой, 2 - кристаллизатор-охладитель, 3 - приёмник сиропа, 4 – вакуум-аппарат для получения маточного утфеля, 5 - резервуары затравочной суспензии, 6 – центробежный сепаратор, 7 – сборник сиропа, 8 – коллектор; 9,16,22 - вакуум-аппарат; 10,17,22 – утфелемешалка; 11,18,25 – утфелераспределитель; 12,19,26 – центрифуга; 13 - клеровочный аппарат; 14,15,20,21 – сборники; 24 - кристаллизационная установка; 27 – аффинационная мешалка

## 1. Заводка центров кристаллизации

Данную технологическую операцию реализуют путем введения в пересыщенный сахаросодержащий раствор различных затравочных материалов, в том числе полученных с использованием Брауншвейгского метода (Пат.№ 2763788) [87]. Способ предусматривает использование в качестве центров кристаллизации кристаллы сахара, образованные самопроизвольно в отдельной установке и затем их фракционируют методом сепарирования до размеров 0,12–0,16 мм, смешивают с сиропом и подают в первый вакуум-аппарат, наращивая их размеры при пересыщении 1,12–1,17 до 0,2–0,3 мм.

Наличие в кристаллическом белом сахаре конгломератов и сростков кристаллов оказывает негативное влияние на его гранулометрический состав. С целью снижения риска их образования наиболее предпочтительно уваривать утфель I кристаллизации по усовершенствованной технологии (Пат. № 2759120) [85]. Для осуществления предложенного способа используют маточный утфель, прошедший предварительное фракционирование методом сепарирования до содержания в нем кристаллов сахара размером 0,160–0,200 мм. Затем полученные на основе маточного утфеля кристаллы наращивают на подкачках смеси сиропа с клеровкой концентрацией 65–75% СВ. При этом в процессе наращивания кристаллов расстояние между ними выдерживают в диапазоне  $1,5 \times 10^{-4}$ – $2,5 \times 10^{-4}$  м. По мере необходимости для раскачивания утфеля вводят фильтрованный сок II сатурации до содержания в увариваемом утфеле примерно 91,0–91,5% СВ.

## 2. Наращивание кристаллов

На данном этапе протекает рост уже образованных центров кристаллизации, после предварительного их закрепления на подкачках сиропа с клеровкой. При этом пересыщение в межкристальном растворе поддерживают в интервале 1,10–1,12. Одновременно с этим проводят энергичную циркуляцию утфеля в вакуум-аппарате с циркуляторами. При повышении температуры и снижении разрежения в вакуум-аппарате

образованные в этот период мелкие кристаллы («мука») растворяют. Более предпочтительно растворять мелкие кристаллы путем ввода в аппарат дополнительных подкачек сиропа с клеровкой, сбалансировав количество введенной подкачками сиропа с клеровкой воды с ее выпариванием при уваривании утфеля.

Для быстрого смешивания с утфелем подкачиваемого в вакуум-аппарат сиропа с клеровкой и предотвращения повторного образования в нем центров кристаллизации его нагревают примерно на 5°С выше температуры кипения утфеля.

Результаты производственных экспериментов подтвердили, что наибольшую эффективность в период наращивание кристаллов показывает их содержание в утфеле находится в диапазоне 35–45% [121,122], поскольку максимум скорости кристаллизации сахарозы может быть обеспечен именно в этих условиях наращивание кристаллов. Кроме того, при этих условиях возможно обеспечить минимальные потери сахара за счет термического разложения сахарозы при минимальном нарастании цветности утфеля.

### 3.Отбор части утфеля из вакуум-аппарата

Исследования в этом направлении позволили сформулировать условия обеспечения роста кристаллов в процессе уваривании утфеля I кристаллизации с промежуточным центрифугированием его части (Пат. № 2757119) [83]. Уваривание утфеля с промежуточным центрифугированием позволяет работать с сиропом высокой чистоты – более 95%, а значит увеличить выход сахара из такого сырья, уменьшить количество последующих перекристаллизаций оттеков и потери сахара. Этот способ предусматривает введение в пересыщенный сахарсодержащий раствор для образования центров кристаллизации маточного утфеля с размерами кристаллов 0,120–0,160 мм и наращивают их до содержания в утфеле в количестве 35–40%. Далее проводят отбор части утфеля из ВА в количестве 30–45% от его общей массы, при этом отобранную часть утфеля направляют на промежуточное центрифугирование.

Экспериментальные исследования в этом направлении позволили определить условия, при которых достигаются лучшие результаты уваривания утфеля:

- наращивание кристаллов следует проводить при поддержании значений коэффициента пересыщения в диапазоне 0,12–0,15 и до достижения содержания в утфеле 88–90% сухих веществ;

- в процессе наращивания необходимо поддерживать температуру в диапазоне 72–76°C;

- оставшийся в вакуум-аппарате после отбора утфель раскачивают смесью сиропа с клеровкой до содержания в утфеле 88–90% сухих веществ;

- для снижения вязкости утфельной массы в нее вводят взятый в количестве 0,04–0,06% к массе утфеля моноглицерид дистиллированный;

- проводят повторное наращивание кристаллов на сиропе с содержанием сухих веществ 65–70%;

- после отбора часть утфеля разделяют в поле действия центробежных сил для отделения от кристаллов общего отека, который представляет собой смесь межкристального (первого) и отека от промывания кристаллов сахара горячей водой в количестве 1,5–2,0% к массе утфеля;

- на последней подкачке сиропа в вакуум-аппарат вводят оттек, получаемый после промежуточного центрифугирования отобранной части утфеля и затем утфель сгущают до 92,0–92,5% СВ.

В данном способе был отработан технологический прием ввода в утфельную массу поверхностно-активных веществ (ПАВ), в частности, моноглицерида дистиллированного (пищевая добавка E471).

Использование ПАВ в процессе уваривания утфеля I кристаллизации в ВА позволяет прекратить его пенение, снизить продолжительность уваривания, уменьшить вязкость утфеля с улучшением его последующего центрифугирования, а также и улучшить гранулометрический состав вырабатываемого сахара [73].

Моноглицерид дистиллированный – это продукт гидролиза твердых жиров растительного или животного происхождения. По своей химической природе он представляет собой производную многоатомного спирта глицерина и высших жирных кислот. Моноглицерид дистиллированный полностью безопасен для человека, а в сахарной промышленности его используют в малых количествах – несколько миллиграммов на 1 кг утфеля. Эта доза обеспечивает необходимый результат, причем в конечном продукте моноглицерид дистиллированный практически отсутствует [121].

#### 4. Сгущение утфеля в вакуум-аппарате до готовности

Проведенные эксперименты позволили установить, что более высокие результаты процесса наращивания кристаллов в утфеле можно достигнуть, если после отбора части утфеля для промежуточного центрифугирования его предварительно раскочать сиропом до содержания сухих веществ 88,0–90,0%.

Эксперименты также позволили установить, что наиболее целесообразно проводить возврат общего отека, полученного после центрифугирования отобранной части утфеля, по завершению процесса уваривания утфеля на сиропе с клеровкой.

Содержание сухих веществ в увариваемом утфеле по завершению этого процесса достигают 92,0–92,5% сухих веществ, однако уваривание могут проводить и до более высокого содержания сухих веществ.

#### 5. Спуск утфеля и его центрифугирование

Перед спуском утфеля в вакуум-аппарате отключают систему разрежения и подачу пара в греющую камеру. Затем открывают спусковой клапан и вентиль, который соединяет вакуум-аппарат с атмосферой. Для равномерного спуска утфеля в вакуум-аппарате поддерживают небольшое разрежение (остаточное давление 0,080 – 0,087 МПа). При спуске утфеля в холодную утфелемешалку его температура понижается на 5–6°C, что приводит к увеличению коэффициента пересыщения межкристалльного раствора на 0,1, и появляется опасность образования вторичных центров кристаллизации, т.е. «муки». Поэтому во время спуска утфель опрыскивают

горячей водой температурой 75°C, что соответственно может привести к снижению коэффициента пересыщения до 1,03–1,06. На эту операцию обычно расходуется 0,5% воды к массе утфеля.

Далее утфель I кристаллизации разделяют в центрифугах в поле действия центробежных сил. В ходе экспериментальных исследований были уточнены условия проведения разделения утфеля I кристаллизации. Результаты этих исследований позволили сформулировать условия реализации новых способов центрифугирования утфеля I кристаллизации.

Стоит отметить, что повышенный расход промывной воды приводит к увеличению энергозатрат, а также потерям сахарозы в продуктивном отделении [156], поэтому промывание кристаллов сахара рекомендуется проводить при минимальном содержании в них межкристального раствора. Эти условия достигаются, когда начало промывки и момент окончания отделения основной массы межкристального раствора совпадают.

В пространстве между вращающимся ротором и кожухом центрифуги установлен чувствительный элемент, который при помощи пневмосилового преобразователя переводит механическое воздействие отделяемых оттеков в стандартный сигнал для управления работой центрифуги. В основу технологии центрифугирования утфеля по «гибкой» временной программе положено фиксирование момента отделения первого и второго оттеков по величине их ударного воздействия на чувствительный элемент (рис.24).

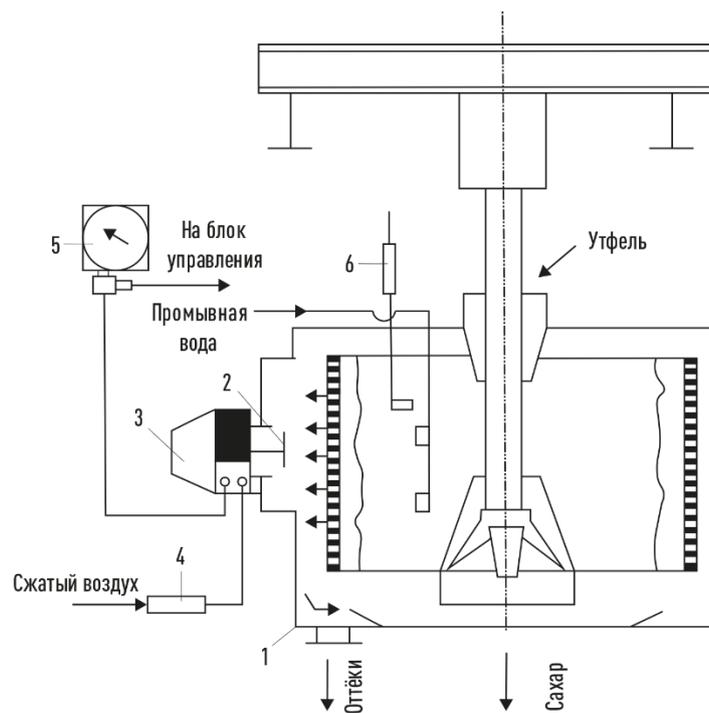


Рисунок 24 – Схема установки для центрифугирования утфеля по «гибкой» временной программе:

1 – центрифуга; 2 – чувствительный элемент; 3 – пневмосилового преобразователя; 4 – манометр; 5 – электроконтактный манометр; 6 – устройство контроля загрузки утфеля в ротор центрифуги

Исследования в этом направлении позволили разработать способ разделения утфеля I кристаллизации (Пат.№ 2771068) [89]. Согласно разработанной технологии перед подачей в ротор центрифуги температуру утфеля выдерживают в диапазоне 68–72°C. Установленное на центрифуге устройство фиксирует отделение межкристального раствора и начало промывания кристаллов с передачей этой информации в блок управления центрифугой. Промывание кристаллов проводят в два этапа - сначала сахаросодержащим раствором, концентрацией 70–75% сухих веществ из расчета 1,5–2,5% к массе утфеля и температурой 68–72°C, а затем горячей водой температурой 80–85°C при ее расходе 0,16–0,26% к массе утфеля в секунду.

Фиксирование момента отделения оттеков позволяет уменьшить их количество, а также продуктов перекристаллизаций оттеков, что в свою очередь позволяет снизить потери сахара в кристаллизационном отделении на 0,015–0,025% к массе свеклы.

Дальнейшие эксперименты были направлены на отработку технологии промывания сахара с применением химических реагентов (Пат. № 2771067) [88]. Подобный процесс разделения утфеля I кристаллизации в поле действия центробежных сил может быть также использован для создания получения ароматизированного кристаллического сахара (Пат.№ 2758295) [84].

В табл. 17 приведены результаты уваривания утфеля с отбором его части и последующим промежуточным центрифугированием.

Таблица 17 – Сравнительные результаты уваривания утфеля I кристаллизации

Основные показатели	Технология уваривания	
	Предлагаемая	Известная
Чистота %:		
- утфель I кристаллизации	91,90	91,95
- первый оттек	83,50	84,01
- второй оттек	90,20	91,20
Содержание кристаллов в утфеле, % к его массе	49,10	48,55
Время уваривания утфеля до готовности, час	5,60	6,10
Чистота мелассы, %	58,30	58,80
Эффект кристаллизации, %	33,10	32,70

Из данных табл.17 видно, что уваривание утфеля I кристаллизации по предполагаемой технологии позволяет увеличить содержание в нем кристаллов на 0,55%. При этом разработанная технология позволяет достичь более высокого значения эффекта кристаллизации сахарозы. Эффект кристаллизации по разработанной технологии составил 33,10%, тогда как по известной – 32,70%. Также эксперименты показали, что предложенный способ позволяет снизить чистоту мелассы на 0,5%.

Также, принятые технологические решения позволяют сократить длительность уваривания утфеля I кристаллизации, повысить физико-

химические и гранулометрические показатели качества кристаллического белого сахара (табл.18).

Таблица 18 – Физико-химические и гранулометрические показатели качества кристаллического белого сахара

Основные показатели	Технология уваривания	
	Предлагаемая	Известная
Цветность, ед.опт.плотности	102,00	104,00
Массовая доля влаги,%	0,09	0,10
Мутность, физ. ед.	22,70	30,20
Редуцирующие вещества, %	0,037	0,040
Зола, %	0,022	0,030
Гранулометрический состав:		
- средний размер кристаллов, мм	0,74	0,70
- коэффициент неоднородности, %	25,8	27,6

В табл.19 представлены усредненные результаты экспериментальных испытаний в условиях ОА «Сахарный комбинат Отрадинский» предлагаемой технологии в сравнении с известной. Особенности производственных испытаний разработанной технологии были эксперименты по увариванию утфеля I кристаллизации в двух смежных вакуум-аппаратах.

Таблица 19 – Результаты уваривания утфеля I кристаллизации с использованием кристаллической основы по предлагаемой и известной технологиям

Основные показатели	Технология уваривания	
	Предлагаемая	Известная
Чистота, %		
- утфель I кристаллизации	91,90	91,95
- первый оттек	83,20	83,90
- второй оттек	90,15	90,75
Содержание кристаллов в утфеле, % к его массе	49,30	48,50
Общее время уваривания утфеля, час	5,70	6,30
Общее время цикла центрифугирования утфеля, мин	2,82	3,03
Чистота мелассы, %	58,35	58,90
Эффект кристаллизации, %	33,60	32,50
Количество сросшихся кристаллов в утфеле, %	34,60	47,30

В результате заводских испытаний комплексной технологии было установлено, что она позволяет повысить процентное содержание кристаллов в утфеле на 0,7% при одновременном улучшении физико-химических и гранулометрических показателей кристаллического белого сахара (табл. 20). Кроме того, работа продуктового отделения по комплексной технологии позволила сократить длительность уваривания утфеля I кристаллизации.

Таблица 20 – Физико-химические и гранулометрические показатели качества кристаллического белого сахара

Основные показатели	Технология уваривания	
	Предлагаемая	Известная
Цветность, ед.опт.плотности	101,00	104,00
Массовая доля влаги,%	0,09	0,10
Мутность, физ. ед.	21,50	31,40
Редуцирующие вещества, %	0,030	0,048
Зола, %	0,020	0,031
Гранулометрический состав:		
- средний размер кристаллов, мм	0,79	0,71
- коэффициент неоднородности, %	23,4	28,3

## Расчет эффективности проведенных исследований

### Исходные данные

1. Производительность завода, т/сут.	5600;
2. Продолжительность сезона, сут.	110;
3. Себестоимость 1 т сахара, руб.	48000;
4. Выход сахара, % к м. св.	13,50;
5. Увеличение выхода сахара после внедрения научных разработок в производстве, %	0,55;
6. Стоимость 1 т мелассы, руб.	3000;
7. Стоимость научных работ, тыс. руб.	400000;
8. Стоимость дополнительного оборудования и монтажа, млн. руб.	8166400;
9. Чистота мелассы, %	60.

### Расчет

1. Капитальные затраты с учетом стоимости научных разработок

$$8166400 + 400000 = 8566400 \text{ руб.}$$

2. Количество переработанной свеклы за сезон

$$5600 \times 110 = 616000 \text{ т.}$$

3. Количество сахара, полученного до внедрения

$$\frac{616000 \times 14,50}{100} = 89320 \text{ т.}$$

4. Количество сахара, полученного после внедрения

$$\frac{616000 \times (14,50 + 0,7)}{100} = 93632 \text{ т.}$$

5. Дополнительные затраты:

а) на текущий ремонт

$$\frac{8166400 \times 7}{100} = 571648 \text{ руб.};$$

б) на амортизацию

$$\frac{8166400 \times 12}{100} = 979968 \text{ руб.};$$

в) общие затраты

$$571648 + 979968 = 1551616 \text{ руб.};$$

6. Количество недополученной мелассы при мелассообразующем коэффициенте

$$K = \frac{60}{100 - 60} = 1,5;$$

7. Увеличение количества сахара после внедрения на производстве

$$93632 - 89320 = 4312 \text{ т,}$$

отсюда имеем:  $4312 \times 1,5 \times 3000 = 19404000 \text{ руб.};$

8. Полная себестоимость сахара до внедрения

$$89320 \times 48000 = 4287360000 \text{ руб.};$$

9. Полная себестоимость сахара после внедрения

$$4287360000 + 19404000 = 4306764000 \text{ руб.};$$

10. Себестоимость 1 т сахара после внедрения

$$\frac{4306764000}{92708} = 46455,14 \text{ руб.};$$

11. Снижение себестоимости

$$48000 - 46455,14 = 1544,86 \text{ руб.};$$

12. Определение прироста прибыли

$$92708 \times 1544,86 - 1551616 = 141669265 \text{ руб.};$$

13. Срок окупаемости

$$\frac{8566400}{141669265} \approx 0,060 \text{ производственного сезона.}$$

Результаты расчета представлены в табл. 21.

Таблица 21 - Показатели определяющие экономическую эффективность диссертационной работы

Наименование показателя	До внедрения	После внедрения
Производственная мощность завода, т/сут	5600	5600
Длительность производственного сезона, сут.	110	110
Объем производства, тыс.т.	89320	93632
Выход кристаллического сахара, % к м.св.	14,50	15,20
Дополнительный выпуск кристаллического сахара, т.	-	4312
Себестоимость 1 т кристаллического сахара, руб.	48000	46455,14
Прирост прибыли, руб.	-	141669265
Капитальные вложения, тыс. руб.	-	8566400
Срок окупаемости, сезон	-	0,060

Таким образом, из данных табл. 21 видно, что использование предлагаемой технологии на сахарном заводе мощностью 5600 тыс. тонн сырья/сутки оказывает положительный экономический эффект, как и снижение себестоимости вырабатываемого кристаллического белого сахара снизилась на 3,3%.

## 5.2. Разработка новых видов продукции на основе сахарозы

Белый сахар относится к категории продукции высокого социального значения, поэтому он является идеальной основой для разработки сахаросодержащих продуктов улучшенной пищевой ценности [71,80,86,91].

В ходе дальнейших исследований на основе уточнения условий и технологических параметров процесса гранулирования сахарозы был разработан и защищен патентом на изобретение способ получения сахаросодержащего продукта, обогащенного экстрактом зеленого чая и β-каротином (Пат. № 2774428) [92].

Блок-схема производства гранулированного сахаросодержащего продукта с антиоксидантами представлена на рис. 25.

В табл.22 приведены обобщенные данные оптимальных технологических показателей при производстве гранулированного сахаросодержащего продукта.

Таблица 22 - Оптимальные технологические показатели при производстве гранулированного сахаросодержащего продукта

Показатель	Оптимальные значения
Температура сахарного сиропа перед гранулированием, °С	95-105
Температура воздуха в грануляторе, °С	
на входе	110-120
на выходе	60-80
Температура воздуха в смесителе, °С	
на входе	80-85
на выходе	40-50
Удельный расход воздуха на 1 кг гранулированного сахара, кг/кг	16-18
Концентрация сухих веществ сахаросодержащего раствора перед гранулированием, %	80-85
Количество сиропа мальтита, подаваемого в гранулятор, %	0,2-0,3
Размер затравочных гранул, мм	0,65-1,3
Влажность гранул после гранулятора, %	0,2-0,3
Размер гранул на выходе, мм	2,0-2,5

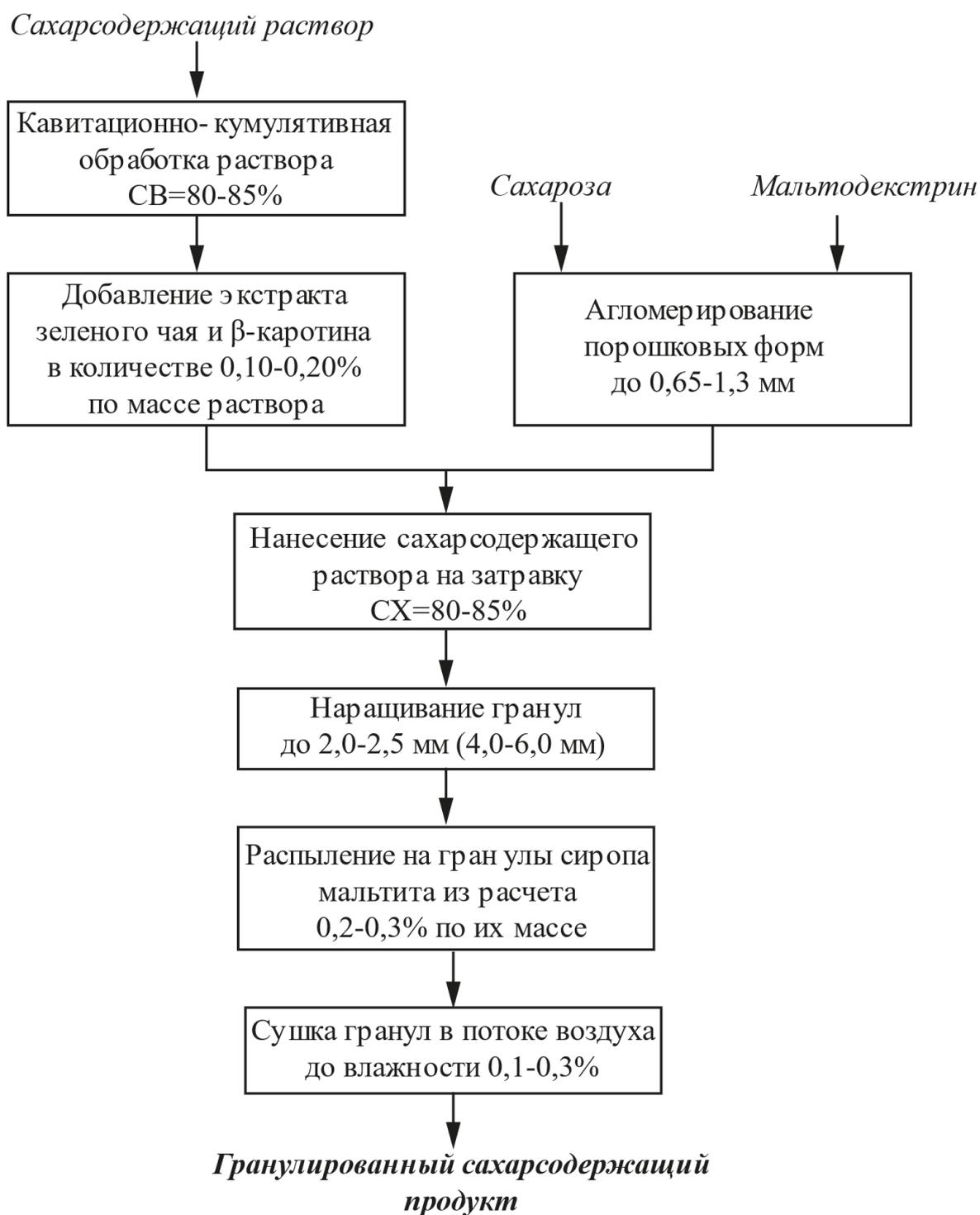


Рисунок 25 – Блок-схема производства гранулированного сахаросодержащего продукта

Гранулирование сахаросодержащего продукта осуществляется в грануляторе (рис. 26).

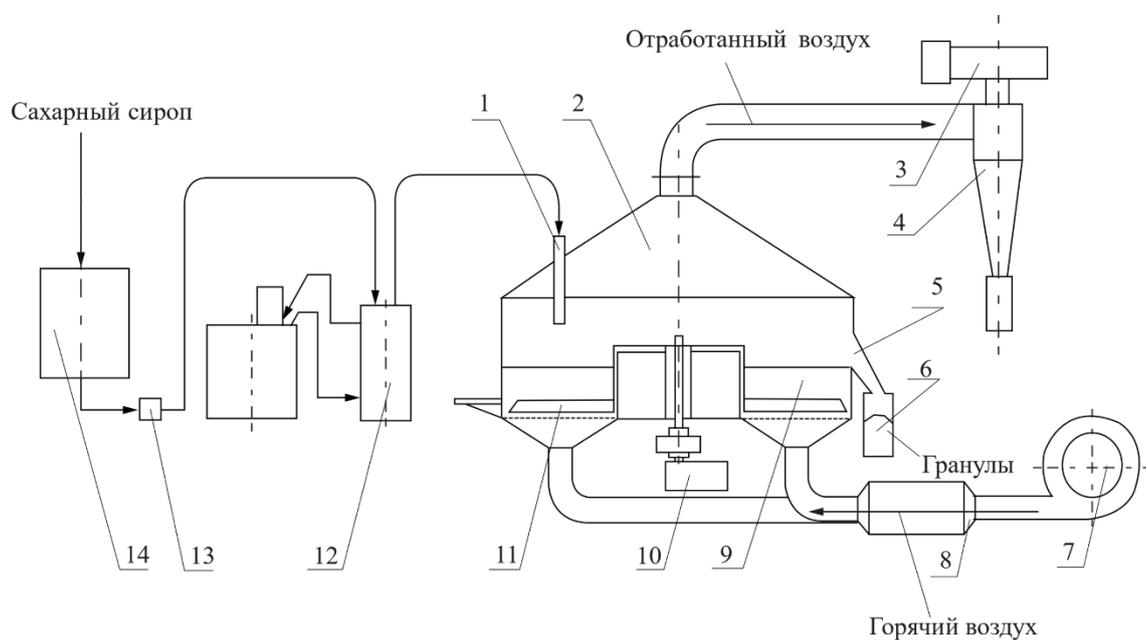


Рисунок 26 - Схема устройства для грануляции сахаросодержащего продукта: 1 – форсунка; 2 – рабочий корпус гранулятора; 3 – вентилятор; 4 – циклон; 5 – выгрузочное отверстие; 6 – приемный сборник; 7 – вентилятор; 8 – колорифер; 9 – слой гранул; 10 – электропривод; 11 – шесть лопастей; 12 – теплообменник; 13 – насос; 14 – сборник

В основе разработанного способа лежит процесс нанесения на затравку концентрированного сахаросодержащего раствора. На рис. 27 представлена схема формирования гранулы гранулированного сахаросодержащего продукта.

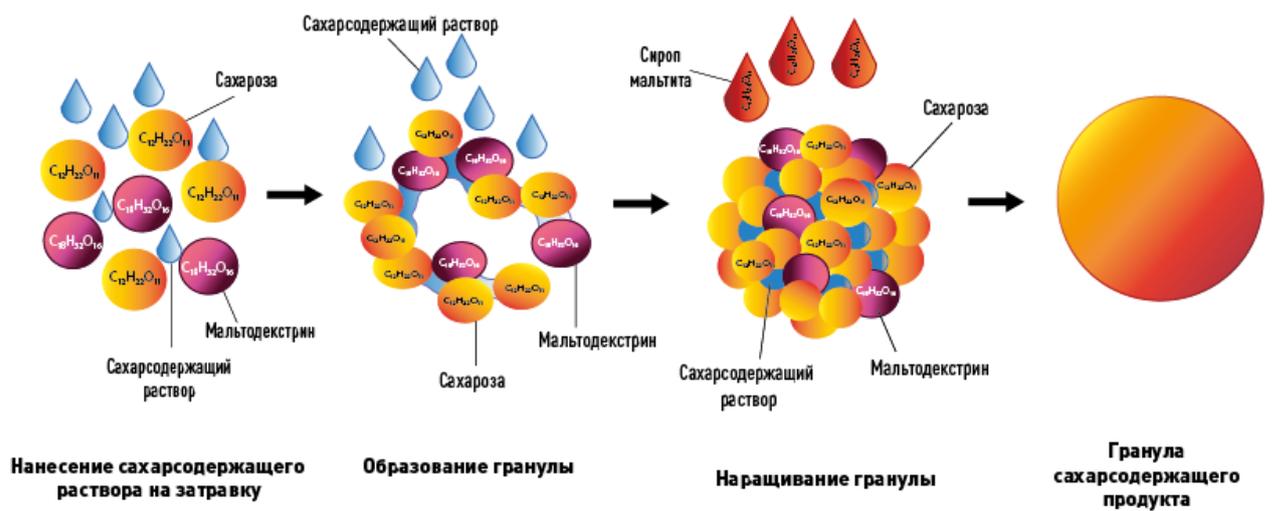


Рисунок 27 – Схема формирования гранулы сахаросодержащего продукта

Согласно разработанному способу первоначально подготавливают затравочные гранулы, в качестве которых используют взятые в равных количествах гранулы сахарозы и мальтодекстрина. Использование в качестве затравки этих ингредиентов позволяет снизить энергоёмкость готового сахаросодержащего продукта. Кроме того, внесение в состав затравки мальтодекстрина позволяет сформировать структуру продукта и придать ему однородность.

С целью улучшения гранулометрических характеристик затравочных гранул данный способ предусматривает агломерирование порошковой формы сахарозы и мальтодекстрина до размера 0,65–1,3 мм. Агломерирование представляет собой процесс слипания сравнительно однородных по форме и величине частиц друг с другом в результате которого увеличивается размер этих частиц, т.е. образуются агломераты.

В результате экспериментов были уточнены требования к размерному диапазону затравочных гранул. Установлено, что оптимальные условия наращивания затравки могут быть достигнуты при ее размере в диапазоне 0,65–1,3 мм и при отклонении от него эти условия существенно ухудшаются.

Параллельно для нанесения на поверхность затравочных гранул и их дальнейшего наращивания подготавливают сахаросодержащий раствор

концентрацией 80–85% сухих веществ. Отличительной особенностью данного способа является то, предварительно в сахаросодержащий раствор вносят экстракт зеленого чая и  $\beta$ -каротин в равных количествах из расчета 0,10 – 0,20% по массе раствора.

Экстракт зеленого чая получают из неферментированных чайных листьев, содержащих фенольные соединения. Полифенолы зеленого чая относятся к природным соединениям с антиоксидантами и антиканцерогенным потенциалом. При этом учитывается тот факт, что они чувствительны к высокой температуре и щелочному рН.

$\beta$ -каротин считается одним из наиболее активных антиоксидантов. Он не только гасит синглетный кислород, но и ингибирует перекисное окисление липидов. Особенно  $\beta$ -каротин чувствителен к воздействиям окружающей среды и может быть подвержен деградации. В следствии наличия в нем множества сопряженных двойных связей  $\beta$ -каротин склонен к автоокислению в период обработки пищевых продуктов. К факторам способным ускорить процесс разложения  $\beta$ -каротина относятся температура, свет, активные формы кислорода, свободные радикалы, и катионы переходных металлов [126].

С целью интенсификации перемешивания вводимых добавок, данная технология предусматривает кавитационно-кумулятивную обработку сахаросодержащего раствора. Эту операцию проводят путем подачи сахаросодержащего раствора со скоростью 10–15 м/с в суперкавитирующий статический аппарат при температуре 95–105°C.

В результате кавитационно-кумулятивной обработки происходит изменение физико-химических свойств сахарного раствора. В частности, разрушение межмолекулярных и молекулярных связей способствует улучшению растворения мельчайших кристаллов и одновременно исключает последующее образование возможных центров кристаллизации.

Подаваемый в установку сахаросодержащий сироп равномерно распределяется в виде пленки на поверхности затравочных гранул. При этом

в пленке имеют место два процесса: испарение воды и кристаллизация сахарозы, что обеспечивает рост самых гранул. При достижении определенного размера гранулы разрушаются с образованием новых затравочных центров, что обеспечивает непрерывность процесса получения гранулированного сахара.

Нанесение сахаросодержащего раствора на поверхность гранул в процессе их наращивания в грануляторе, проводят до достижения их размера в диапазоне 2,0–2,5 мм (4,0–6,0 мм). После этого с целью улучшения структуры и прочности на поверхность гранулы распыляют через форсунки сироп мальтита из расчета 0,2–0,3% по их массе. К преимуществам мальтита можно отнести тот факт, что он имеет безводную, низкогигроскопическую, стабильную кристаллическую форму, т.е. он впитывает влагу только при относительной влажности выше 80%. Таким образом, распыление сиропа мальтита на гранулы сахаросодержащего продукта позволяет повысить его стабильность при хранении, а также защитить их от действия окружающей среды.

На завершающем этапе полученные гранулы высушивают до влажности 0,1–0,3%, причем значения данного интервала по влажности получены экспериментально. опыты показали, что при несоблюдении этого интервала ухудшаются условия обеспечения требуемой прочности гранул.

Таким образом, в ходе исследования были уточнены технологические параметры процесса гранулирования кристаллического белого сахара и их пределы, что позволило разработать технологию получения гранулированного сахаросодержащего продукта, обогащенного экстрактом зеленого чая и  $\beta$ -каротином.

#### 5.4. Исследование структурных и термических свойств гранулированных сахаросодержащих продуктов

В ходе исследования был охарактеризован полученный гранулированный сахаросодержащий продукт и дана оценка его органолептических и физико-химических свойств.

Важную роль в формировании технологических свойств пищевых продуктов играет их поверхность, форма, консистенция, вкус и запах, т.е. органолептические показатели. В табл. 23 представлены результаты оценки органолептических показателей кристаллического белого сахара (категории ТС2) и гранулированного сахаросодержащего продукта (Пат. № 2774428).

Таблица 23 - Органолептические характеристики сахара и гранулированного сахаросодержащего продукта

Наименование показателя	Характеристика	
	Белый сахар (ТС2)	Гранулированный сахар (Пат. № 2774428)
Цвет	Белый	Светло-желтый
Внешний вид	Сыпучая масса кристаллов. Присутствуют конгломераты и обломки кристаллов	Однородные гранулы сферической формы без комков
Запах и вкус	Сладкий, без посторонних привкусов и запахов	Сладкий, без посторонних привкусов и запахов
Чистота раствора	Прозрачный раствор без осадка	Светло-желтый раствор, без нерастворимого осадка примесей

Из табл. 23 видно, что гранулированный сахаросодержащий продукт имеет ряд особенностей. Для углубленной оценки внешнего вида образцы сахара и гранулированного сахаросодержащего продукта были исследованы под стереоскопическим микроскопом Micromed MC-5-ZOOM LED. На рис. 28 и рис. 29 представлены цифровые фотографии исследованных образцов.



Рисунок 28 – Микрофотография кристаллического белого сахара (категория ТС2)



Рисунок 29 – Микрофотография гранулированного сахаросодержащего продукта

Анализ микрофотографий позволил установить видимые различия по форме и размеру исследуемых образцов. Из анализа данных рис. 28 и 29 видно, что с визуальной точки зрения гранулы сахаросодержащего продукта имеют более сферическую форму, чем кристаллы сахара. Размер и поверхность гранул зависят от условий нанесения на затравку сахаросодержащего раствора и сиропа мальтита. При наслаивании раствора на поверхность затравочных гранул наблюдается их рост, а их поверхность

приобретает сферическую форму. Из рис. 28 видно, что анализируемый образец обладает свойственной для сахара кристаллической структурой в отличие от гранулированного сахаросодержащего продукта (рис.29).

Известно, что кристаллы сахарозы принадлежат к моноклинной системе. Их строение и рост характеризуются тремя кристаллографическими осями «а», «b», «с» с неравными отрезками. Рост кристаллов сахарозы от их центра неодинаков, и это различие выражается соотношением длин осей координат («а»:«b»:«с») как 1,2595:1:0,8782. Внешний вид кристалла сахарозы, т.е. его кристаллическая форма, характеризуется ограничением и габитусом. При этом под ограничением понимают совокупность граней кристалла, а под габитусом – соотношение между величиной граней. При росте кристаллов габитус остается без изменений, однако если в самом начале кристаллизации сахарозы при линейном размере кристалла 0,05 мм форма кристаллов приобрела двойниковый, иглообразный или плоский вид, то эта форма сохраняется у полностью выросших конечных кристаллов [77].

На рис. 28 видно, что в состав навески кристаллов сахара входят в том числе сrostки кристаллов (конгломераты), при этом они неоднородны по размеру и находятся в диапазоне 0,3–2,0 мм. В тоже время, в гранулированном сахаросодержащем продукте (рис.29) отсутствуют комки гранул, а их размерный диапазон находится в пределах 2,0–2,5 мм, что говорит о их более однородном гранулометрическом составе.

Из визуальной оценки образцов видно, что в отличие от кристаллического белого сахара гранулы сахаросодержащего продукта имеют легкий оттенок, что может быть объяснено наличием в его составе β-каротина. Кроме того, данный оттенок сохраняется и при растворении гранул.

Также дополнительно были оценены физико-химические показатели белого сахара и гранулированного сахаросодержащего продукта (табл.24) [126].

Таблица 24 – Физико-химическая оценка качества кристаллического белого сахара и гранулированного сахаросодержащего продукта

Показатель	Кристаллический белый сахар (ТС 2)	Гранулированный сахаросодержащий продукт
Время растворения, сек.	30	60
Цветность, ед.опт.плотности	104	170, 5
Мутность, ед. опт. плотности	20	26,7
Массовая доля влаги, %, не более	0,10	0,10
Массовая доля редуцирующих веществ (в пересчете на сухое вещество), %, не более	0,04	0,080
Массовая доля золы (в пересчете на сухое вещество), %, не более	0,036	0,090

В следствии наличия в составе гранул  $\beta$ -каротина цветность и мутность их растворов выше, чем белого сахара. Это свидетельствует о том, что полученный гранулированный сахаросодержащий продукт может быть также использован в производстве различных продуктов питания для придания им не только сладости, но и для улучшения их органолептики.

Поскольку в состав гранулированного сахаросодержащего продукта, кроме сахарозы, входят и другие пищевые ингредиенты, содержание редуцирующих веществ и золы в нем существенно выше, чем в кристаллическом белом сахаре.

Одним из важнейших показателей качества сахара является массовая доля влаги [32,111,112]. В производстве белый сахар выходит из центрифуг влажностью 1,5%, однако такой сахар склонен к образованию комков, поэтому его необходимо высушить до содержания влаги 0,10% при хранении в мешках и до 0,04% при бестарном хранении в силосах. Миграция воды между окружающей средой и кристаллами может привести к изменению органолептических, физико-химических и микробиологических показателей качества сахара, поэтому для обеспечения его высоких качественных

показателей и продукции на основе сахара важно понимать характер связей влаги в кристаллах. Исходя из данных табл. 23 видно, что в кристаллическом белом сахаре и в гранулированном сахаросодержащем продукте массовая доля влаги составляет 0,10%. Это говорит о том, что в гранулах отсутствует повышенное содержание влаги.

Для более углубленного изучения технологических свойств гранулированного сахаросодержащего продукта были рассмотрены термогравиметрические показатели кристаллического белого сахара с влажностью 0,1% и гранулированного сахаросодержащего продукта (Пат. № 2774428) в численном и графическом виде с использованием прибора синхронного анализа STA-449 (рис. 30-31). Условия исследования и температурная программа проведения исследований приведены в табл. 7-8.

В процессе температурного воздействия на гранулы наблюдается потеря массы образца в результате испарения воды пор гранул, а также улетучивание из их внутренней структуры компонентов термического разложения. На кривых ТГ и ДТГ (рис.31) отсутствуют какие-либо перегибы, что свидетельствует об отсутствии свободной влаги в гранулированном сахаросодержащем продукте.

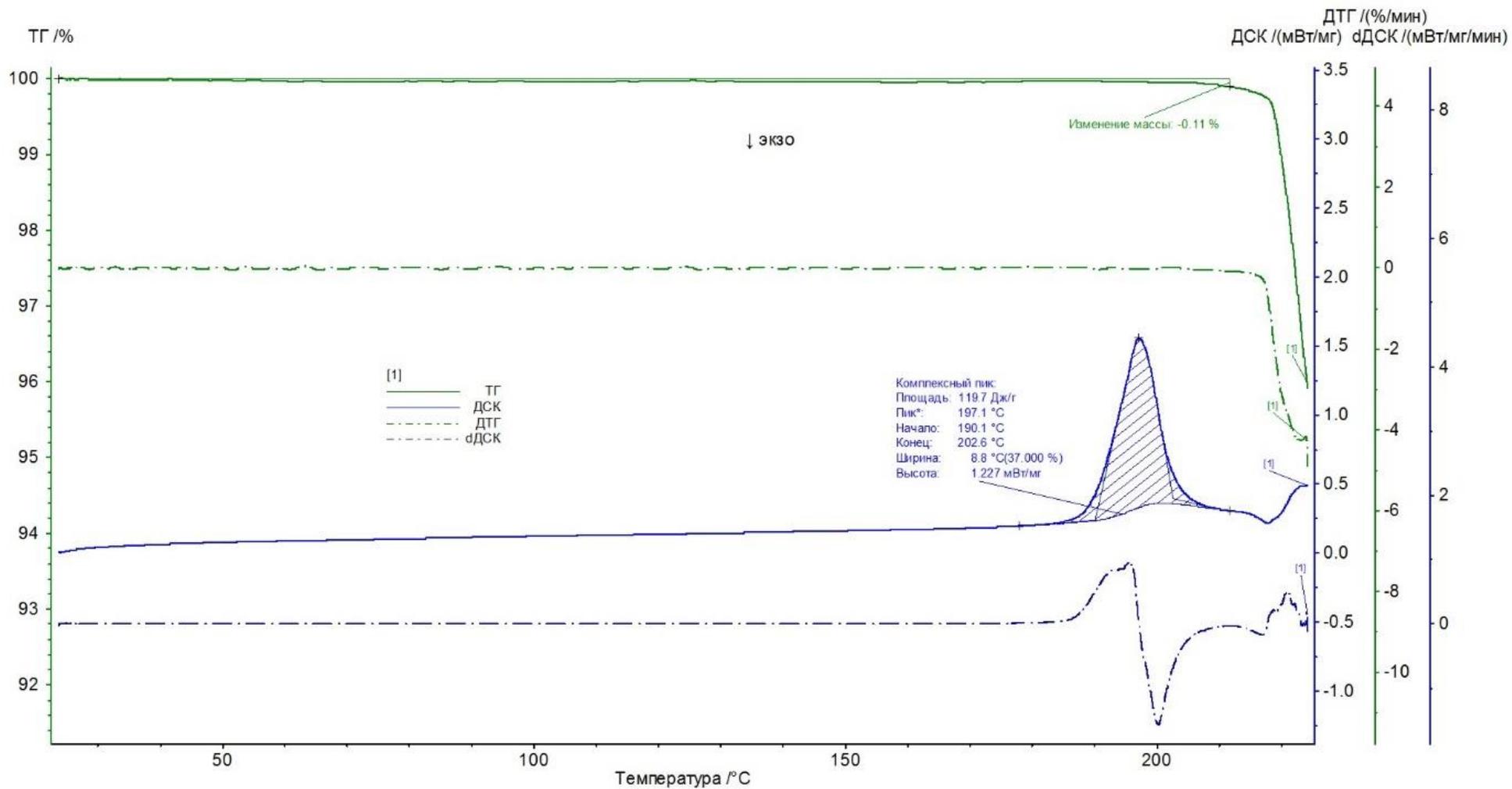


Рисунок 30 – Термограмма кристаллического белого сахара с влажностью 0,1%

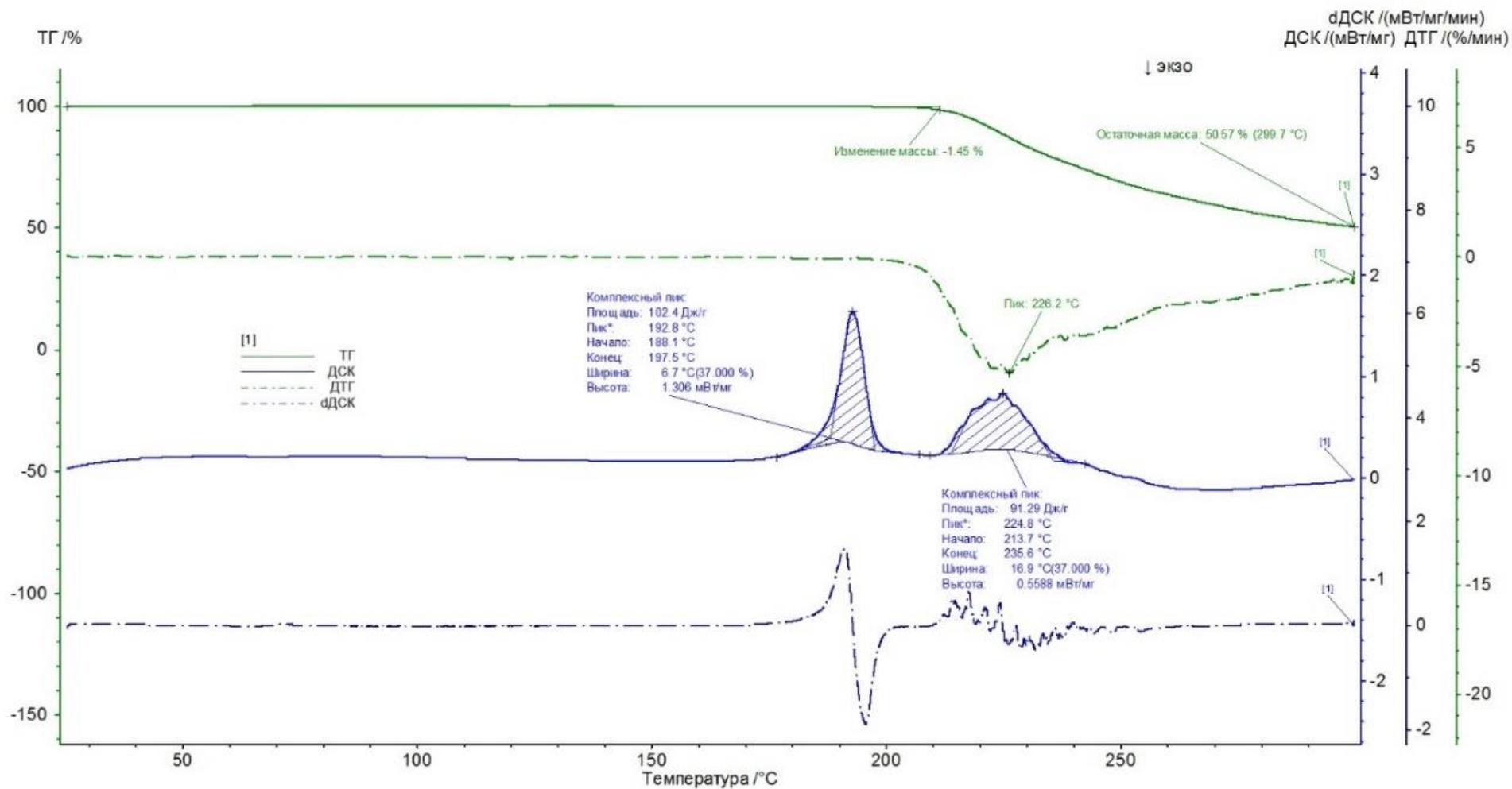


Рисунок 31 - Термограмма гранулированного сахаросодержащего продукта, полученного по Пат. № 2774428

В процессе создания сахаросодержащих продуктов методом гранулирования кристаллы сахарозы обогащаются различными нутриентами, поэтому их термические характеристики отличаются от характеристик чистой сахарозы.

На кривых ДСК наблюдается ряд эндотермических эффектов, характеризующихся изменением показателя энтальпии и сопровождающихся поглощением тепла (табл.25). Интенсивность наблюдаемых эффектов зависит от химического состава входящих в состав гранулированного сахаросодержащего продукта ингредиентов.

Таблица 25 - Изменение кинетических характеристик эндотермических эффектов и массы навески в процессе термолиза образцов сахаросодержащих продуктов

Образцы	Количество эндотермических эффектов	Температурный интервал начала и окончания эндотермического эффекта, $\Delta T$ , °С (кривая ДСК)	Энтальпия $\Delta H$ , Дж/г (кривая ДСК)	Температура пика эндотермического эффекта, °С (кривая ДСК)
<i>Кристаллический белый сахар (влажность 0,1%)</i>	I	190,1–202,6	119,7	197,1
Сахаросодержащий продукт (Пат. № 2774428)	I	188,1–197,5	299,3	192,8
	II	213,7–235,6	181,0	224,8

Исходя из данных табл.25 можно заключить, что кристаллический белый сахар с влажностью 0,1% демонстрирует только один эндотермический эффект при 190,1–202,6°С с температурой пика 197,1°С, тогда как гранулированный сахаросодержащий продукт демонстрируют два пика, причем первые пики возникают в диапазонах температур 179,5–197,5°С, а вторые пики при 204,2–235,6°С. Первый эффект в целом соответствует температуре плавления сахарозы. Второй эндотермический эффект

соответствует термическому разложению включенных в состав сахаросодержащего продукта  $\beta$ -каротина и экстракта зеленого чая.

Наличие эндотермических пиков на термограмме сахаросодержащего продукта может быть объяснено несколькими предположениями, выдвинутыми авторами [175]: полиморфизмом кристаллов, связанным с включением примесей в кристаллическую структуру; наличием дефектов в кристаллах; включением в кристаллы связанной влаги; изменением водородных связей с их разрывом при плавлении; различием в гранулометрическом составе исследованных образцов сахаросодержащих продуктов.

На возникновение эндотермических эффектов оказывает влияние окклюзия обогащенного пищевыми добавками сахаросодержащего раствора внутри гранул, причем именно дефекты кристаллической структуры являются местом первоначального образования компонентов термического разложения. Принимая во внимание тот факт, что второй эндотермический эффект наступает при более высоких температурах, чем первый ( $T=188,1-197,5^{\circ}\text{C}$ ) можно сделать вывод о том, что технология гранулирования позволяет повысить устойчивость и стабильность включенных компонентов.

Учитывая склонность  $\beta$ -каротина и экстракта зеленого чая к деградации, их инкапсуляция методом гранулирования может быть одним из наиболее простых способов сохранения их свойств. Включение  $\beta$ -каротина и экстракта зеленого чая в матрицу сахарозы способствует их защите от кислорода воздуха и действия высоких температур. Кроме того, включение  $\beta$ -каротина и экстракта зеленого чая в состав гранул улучшает их растворимость и пищевую ценность. Пористость агломератов гранул позволяет водным растворам быстро проникать в их структуру и высвободить вводимые добавки для растворения. Кроме того, снижается активность воды, содержание влаги и гигроскопичность гранул. Низкая активность воды в сочетании с высокой концентрацией сахарозы предотвращает микробиологическое размножение, в

результате чего гранулы сахаросодержащего продукта имеют высокую стабильность и хорошо защищены от порчи при хранении.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана комплексная технология уваривания утфеля I кристаллизации. Основные научные и практические результаты, полученные при выполнении работы, представлены в выводах:

1. Исследованы физико-химические показатели качества кристаллического белого сахара ряда отечественных сахарных заводов. Установлено, что в целом он соответствует требованиям ГОСТ 33222-2015. Однако в отдельных образцах сахара зафиксированы незначительные отклонения от требований стандарта по таким показателям как массовая доля сахарозы и редуцирующих веществ, а также цветности. Подтверждено, что существенное влияние на формирование физико-химических показателей кристаллического белого сахара оказывает однородность центров кристаллизации при уваривании утфеля I кристаллизации, а также технологические особенности его разделения в центробежном силовом поле;

2. Усовершенствована физико-математическая модель процесса формирования центров кристаллизации сахарозы в пересыщенных производственных растворах. На ее основе уточнено влияние теплоты кристаллообразования сахарозы на кинетику роста ее кристаллов из пересыщенных растворов в вакуум-аппарате. Получены уравнения для количественной оценки влияния теплоты кристаллообразования на эффективность процесса кристаллизации сахарозы при уваривании утфеля I продукта;

3. Сформулированы и научно обоснованы условия фракционирования центров кристаллизации методом сепарирования. Разработана математическая модель этого процесса, позволяющая определить рациональные условия проведения сепарирования затравочных кристаллов до заданной области их размерных значений с высокой степенью их однородности;

4. Разработаны и защищены патентами на изобретение разработки в области уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации (8 патентов РФ), обеспечивающие не только повышение выхода сахара, но и его качественные показатели. Способы прошли заводскую проверку и признаны эффективными;

5. Разработана и научно обоснована комплексная технология уваривания и центрифугирования утфеля I кристаллизации. Ее применение для условий переработки сырья различной сахаристости позволило сократить время уваривания утфеля на 9,5%, а время одного цикла центрифугирования на 6,6%, при этом выход белого сахара из центрифуги увеличился в среднем на 0,7% к массе утфеля;

6. Показана возможность улучшения технологических свойств сахара гранулированием и уточнена его технология с добавлением экстракта зеленого чая и  $\beta$ -каротина.

7. Исследованы технологические свойства гранулированного сахаросодержащего продукта. На основе методов дифференциально-термического анализа доказана целесообразность гранулирования сахара и определены термогравиметрические характеристики сахаросодержащего продукта.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, И.И. Скорость роста и растворения кристаллов / И.И. Андреев // Журнал русского физико-химического общества. – 1908. – Т.40. – Вып.3. – С.397
2. Арапов, Д. В. Вероятностное моделирование удельной массовой скорости роста сахарных кристаллов / Д.В. Арапов, В.А. Курицын, С.М. Петров, Н.М. Подгорнова, М.А. Зайцева // Техника и технология пищевых производств. – 2021. – Т. 51. – №. 1. – С. 39–52.
3. Арапов, Д.В. Моделирование растворения и роста сахарных кристаллов / Д.В. Арапов, С.Л. Подвальный, С.Г. Тихомиров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – №. 2. – С. 29–41.
4. Бажал, И.Г. Переконденсация в дисперсных системах / И.Г. Бажал, О.Д. Куриленко. – Киев: Наукова думка, 1975. – 216 с.
5. Беляев, А.И. Изменение микрофлоры сахара-песка при его хранении / А.И. Беляев, А.А. Славянский, А.П. Лобанова // Сахарная промышленность. – 1985. – № 5. – С. 46–47.
6. Беляева, Л.И. Научное обоснование и разработка технологии обогащенного сахара: специальность 05.18.05 "Технология сахара и сахаристых продуктов, чая, табака и субтропических культур": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Беляева Любовь Ивановна. – Курск, 2005. – 160 с.
7. Бержец, А.И. Совершенствование технологии центрифугирования утфеля первой кристаллизации: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.05 / Бержец Алексей Игоревич. – М., 2004. – 190 с.
8. Бражников, Н. Н. Совершенствование технологии получения утфеля первой кристаллизации: диссертация ... кандидата технических наук: 05.18.05 / Бражников Николай Николаевич; [Место защиты: Воронеж. гос. технол. акад.]. - Воронеж, 2010. – 222 с.

9. Бремер, Г.И. Жидкостные сепараторы / Г.И. Бремер. - М.: Машгиз, 1957. – 244 с.
10. Бугаенко, И.Ф. Идентификация свекловичного и тростникового сахара / И.Ф. Бугаенко // Сахар. – 2004. - №5. – С. 39–40.
11. Бугаенко, И.Ф. Технология производства сахара из сырца / И.Ф. Бугаенко, Н.А. Чернышева. – М.: Союзроссахар, 2002. – 290 с.
12. Гнездилова, А.И. Развитие научных основ кристаллизации лактозы и сахарозы в многокомпонентных водных растворах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.04 / Гнездилова Анна Ивановна. – Вологда, 2000. – 440 с.
13. Гольденберг, С. П. Влияние формы распределения и размера кристаллов затравки на процесс кристаллизации сахарозы / С.П. Гольденберг, А.С. Максимов, А.П. Лапусь // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2017. – № 2. – С. 40–44.
14. ГОСТ 12569-2016 «Сахар. Правила приемки и методы отбора проб». – введ. 01.07.2017. – М.:Стандартинформ, 2017. – 12 с.
15. ГОСТ 12571-2013 «Сахар. Метод определения сахарозы». – введ. 01.02.2015. – М.:Стандартинформ, 2016. – 12 с.
16. ГОСТ 12572-2015 «Сахар. Метод определения цветности». – введ. 01.07.2016. – М.:Стандартинформ, 2018. – 8 с.
17. ГОСТ 12573-2013 «Сахар. Метод определения ферропримесей». – введ. 01.02.2015. – М.:Стандартинформ, 2014. – 7 с.
18. ГОСТ 12574-2016 «Сахар. Методы определения золы». – введ.01.07.2017. – М.:Стандартинформ, 2018. – 11 с.
19. ГОСТ 12575-2001 «Сахар. Методы определения редуцирующих веществ». – введ.01.01.2003. – М.:Стандартинформ, 2012. – 14 с.
20. ГОСТ 12576-2014 «Сахар. Методы органолептического анализа». – введ. 01.01.2016. – М.:Стандартинформ, 2019. – 12 с.
21. ГОСТ 12579-2013 «Сахар. Метод определения гранулометрического состава». - М.:Стандартинформ, 2014. – 12 с.

22. ГОСТ 26968-86 «Сахар. Методы микробиологического анализа». – введ. 01.07.1987. – М.:Стандартинформ, 2012. – 6 с.
23. ГОСТ 33222-2015. «Сахар белый. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2019. – 19 с.
24. ГОСТ 34201-2017 «Сахар. Определение диоксида серы йодометрическим методом». – введ. 01.07.2018. – М.:Стандартинформ, 2017. – 11 с.
25. ГОСТ Р 54641 – 2011 «Сахар. Метод определения крахмала». – введ. 01.01.2013. – М.:Стандартинформ, 2019. – 11 с.
26. ГОСТ Р 54642-2011 «Сахар. Методы определения влаги и сухих веществ». – введ. 01.01.2013. – М.:Стандартинформ, 2013. – 8 с.
27. Грабка, Я. Процесс уваривания утфелей при заводке кристаллов специальной пастой / Я. Грабка // Сахарная промышленность.- 1987. – № 12. – С. 22–25.
28. Григоров, С.В. Анализ микроэлементного состава сахара-песка / С.В. Григоров, В.И. Тужилкин, А.П. Щеренко // Сахарная промышленность. – 1984. – № 3. – С. 44–45.
29. Григоров, С.В. Приготовление кристаллической основы для уваривания утфеля первой кристаллизации / С.В. Григоров, В.И. Тужилкин, А.Р. Сапронов // Сахарная промышленность. – 1984. – №8. – С.25–29.
30. Громковский, А.И. Определение среднего размера кристаллов сахара методом фильтрования / А.И. Громковский, Н.А. Ремизова //Сахарная промышленность. – 1972. – №6. – С.41–44.
31. Гулый, И.С. Физико-химические процессы сахарного производства / И.С. Гулый, В.М. Лысянский, Л.П. Рева. – М.: Агропромиздат, 1984. – 264 с
32. Гурьева, К.Б. Влияние основных факторов системы хранения на изменение цветности сахара-песка / К.Б. Гурьева, Е.А. Тарасова // Сахар. – 2014. – №9. – С. 39–41.

33. Гурьева, К.Б. Оценка объективности метода определения гранулометрического состава сахара-песка / К.Б. Гурьева, Е.А. Тарасова // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. – 2014. – № 2(2). – С. 80–86.

34. Даишева, Н.М. Требования к качеству и безопасности сахара, используемого при производстве пищевой продукции / Н.М. Даишева, И.Н. Люсый, С.О. Семенихин, Н.И. Котляревская, М.М. Усманов // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2018. – № 8. – С. 33–42.

35. Дешевая, И.Ю. Современные тенденции стандартизации в области сахарной промышленности / И.Ю. Дешевая, А.А. Славянский, Е.А. Тарасова // Сахар. – 2016. – № 5. – С. 33–36.

36. Дымар, О.В. Снижение зольности сахарного сиропа / О.В. Дымар, О.К. Никулина, М.Р. Яковлева // Наука, питание и здоровье. – 2020. – С. 28–32.

37. Егорова, М. И. Аспекты определения редуцирующих веществ в белом сахаре методом Найта и Аллена / М.И. Егорова, Л.Ю. Смирнова // Сахар. – 2023. – № 1. – С. 32–37.

38. Егорова, М.И. Методологические аспекты формирования системы методик контроля технологического потока производства сахара / М.И. Егорова, Е.В. Широких, И.С. Михалева, Л.Н. Пузанова // Вестник ВГУИТ. – 2019. - Т. 81. - №2. – С. 162–169.

39. Егорова, М.И. Результаты мониторинга флокулообразующей способности растворов белого сахара / М.И. Егорова, Л.Н. Пузанова, И.С. Михалева, Я.А. Кретьова // Достижения науки и техники АПК. – 2021. – Т. 35. – № 3. – С. 67–72.

40. Ермолаев, В. А. Разработка технологических режимов сушки сахара при пониженном давлении / В.А. Ермолаев, А.А. Славянский, Д.Е. Фёдоров, Д.П. Митрошина, Н.Н. Лебедева // Сахар. – 2021. – №. 11. – С. 36–39.

41. Ермолаев, В.А. Исследование процессов вакуумной сушки сахара / В.А. Ермолаев, А.А. Славянский, Д.Е. Федоров, В.А. Грибкова, Н.В. Николаева // Сахар. – 2022. – № 1. – С. 44–48.
42. Еремин, А.В. Идентификация источника теплоты на основе аналитического решения задачи теплопроводности / А.В. Еремин, Е.В. Стефанюк, Л.С. Абишева // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – 59(5). – С.339–346.
43. Егорова, М.И. Совершенствование метода определения гранулометрического состава сахара / М. И. Егорова, А. А. Милых, В. В. Райник // Кондитерские изделия XXI века, Москва, 26–28 февраля 2013 года / Материалы Девятой международной конференции. – Москва: ООО "Пищепромиздат", 2013. – С. 176–178.
44. Жуков, В. Г. Получение аналитической формулы расчета предельных диаметров пор осадков в фильтрующих центрифугах / В.Г. Жуков, В.М. Чесноков, Н.Д. Лукин // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2023. – № 1(391). – С. 114–119.
45. Зелепукин, Ю.И. Анализ работы продуктовых отделений сахарных заводов в сезоне 2020/21 г / Ю.И. Зелепукин, В.П. Яньшин, С.Ю. Зелепукин // Сахар. – 2022. – №. 3. – С. 16-20.
46. Зубченко, А.В. Новое в кинетике кристаллизации сахара / А.В. Зубченко. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 159 с.
47. Иванова, В.Н. Изучение состояния воды в объектах биоорганической природы методом спектроскопии ядерного магнитного резонанса / В.Н. Иванова, Н.Д. Лукин, В.И. Привалов и др. – М.: ТД "ДеЛи", 2019. – 123 с.
48. Ильина, В. В. Повышение эффективности технологии получения и центрифугирования утфеля I кристаллизации: специальность 05.18.05 "Технология сахара и сахаристых продуктов, чая, табака и субтропических культур" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ильина Валентина Васильевна. – Москва, 2005. – 187 с.

49. Инструкция по химико-техническому контролю и учету сахарного производства. – Киев: ВНИИСП, 1983. – 475 с.
50. Каганов, И.Н. Кристаллизационные схемы при изменяющемся качестве густого сиропа / И.Н. Каганов, А.А. Славянский // Сахарная промышленность. – 1974. – №1. – С.10–12.
51. Каганов, И.Н. Процесс кристаллизации сахара: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.05 / Каганов Исаак Натанович. – М., 1968. – 354 с.
52. Казарцев, Д.А. Математическое моделирование процесса вакуумной сушки сахара / Д.А. Казарцев, А.А. Славянский, В.А. Ермолаев, Н.Н. Лебедева, Д.П. Митрошина // Сахар. – 2022. – № 5. – С. 30–34.
53. Карамзин, В.А. Кинетика суспензий (сепарирование, центрифугирование, кристаллообразование) / В.А. Карамзин, Е.В. Семенов, А.А. Славянский, А.В. Карамзин. – М.: ООО "Издательство "Спутник+", 2018. – 240 с.
54. Кодекс Алиментариус. Мед, сахара, какао-продукты и шоколад / Пер.с англ. – М.: Издательство «Весь Мир», 2007. – 48 с.
55. Кот, Ю.Д. Математические зависимости процесса центрифугирования утфелей / Ю.Д. Кот. – Труды ВНИИСП. – Вып. XII. – М.: Пищевая промышленность, 1964. – С.227–237.
56. Кот, Ю.Д. Рост кристаллов в растворах / Ю.Д. Кот, Е.М. Глыгало . – К.: Труды ВНИИСП, 1971. – С.230–246.
57. Кравчук, А.Ф. Рекристаллизация в дисперсных растворах сахарозы / А.Ф. Кравчук // Сахар. – 2012. – № 10. – С. 39–43.
58. Круглик, С. В. Об оптимизации технологии на отдельных стадиях производства сахара / С. В. Круглик // Сахар. – 2020. – № 4. – С. 27–35.
59. Кулинченко, В.Р. Промышленная кристаллизация сахаристых веществ / В.Р. Кулинченко, В.Г. Мирончук. – Киев: НУПТ, 2012. – 426 с.
60. Кульнева, Н. Г. К вопросу о формировании качества сахара-песка / Н.Г. Кульнева, А.А. Швецов, А.И. Шматова // Товаровед продовольственных товаров. – 2016. – № 6. – С. 48–51.

61. Кульнева, Н. Г. Количественный анализ окрашенных соединений желтого сахара / Н.Г. Кульнева, П.Н. Саввин, Г.Э. Бирабо, П.Ю. Сурин // Биотехнологические аспекты управления технологиями пищевых продуктов в условиях международной конкуренции. – 2019. – С. 382–386.

62. Кульнева, Н. Г. Совершенствование кристаллизации утфелей в сахарном производстве / Н.Г. Кульнева, В.А. Федорук, Н.А. Матвиенко, Е.М. Пономарева // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – Т. 83. – №. 1 (87). – С. 86–93.

63. Лебедева, Н. Н. Разработка эффективной технологии уваривания утфеля первой кристаллизации: специальность 05.18.05 "Технология сахара и сахаристых продуктов, чая, табака и субтропических культур": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лебедева Наталья Николаевна. – Москва, 2013. – 199 с.

64. Лукин, Н.Д. Оперативный учёт и контроль свеклосахарного производства / В.И. Тужилкин, Д.А. Клемешов, Г.А. Доненко, Н.Д. Лукин // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2019. – № 1. – С. 20–34.

65. Лундин, А.Г. ЯМР-спектроскопия / А.Г.Лундин, Э.И.Федин. - М.: Мир, 1986. – 167 с.

66. Люсый, Н.А. Кристаллизация сахарозы / Н.А. Люсый, И.Н. Люсый, Ю.И. Молотилин. – Краснодар: СКНИИССиС, 2004. – 303 с.

67. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. - М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.

68. Магомедов, М. Г. Технология получения пасты из сахарной свеклы / М.Г. Магомедов // Вестник ВГУИТ. - 2015. - № 3. - С. 138–141.

69. Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации», утв. руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека - Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 22.07.2021

70. Мохова, Т. Б. Повышение эффективности технологии уваривания утфеля первой кристаллизации: специальность 05.18.05 "Технология сахара и сахаристых продуктов, чая, табака и субтропических культур": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мохова Татьяна Борисовна. – Москва, 2008. – 163 с.

71. Митрошина, Д.П. Разработка новых видов функциональных продуктов на основе сахарозы / Д.П. Митрошина, А.А. Славянский, Н.В. Николаева и др. // Сахар. – 2022. – № 2. – С. 32–37.

72. Митрошина, Д.П. Проблемы подготовки затравочных кристаллов для уваривания утфеля I кристаллизации / Д.П. Митрошина, А. А. Славянский // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова: сборник статей, Москва, 06–08 июня 2022 года. Том 2. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 215–219.

73. Михайличенко, М. С. Качественные показатели белого сахара, полученного с применением ПАВ и деколоранта / М.С. Михайличенко, Л.И. Беляева // Молодежь и XXI век-2019. – 2019. – С. 245–249.

74. Мищук, Р.Ц. Термодинамика в технологии кристаллизации сахара. Сообщение 4. Термохимические данные растворов сахарозы / Р.Ц. Мищук // Сахар. – 2010. – №. 11. – С. 47–49.

75. Мищук, Р.Ц. Термодинамика в технологии кристаллизации сахара / Р.Ц. Мищук // Сахар. – 2011. – №. 12. – С. 46–49.

76. Находкина, В.З. О микрофлоре сахара-песка / В.З. Находкина // Сахарная промышленность. – 1973. – № 1. – С. 45–48.

77. Николаева, Н.В. Кристаллы сахарозы как основа сахаросодержащих продуктов / Н.В. Николаева, Д.П. Митрошина, А.А. Славянский, В.А. Грибкова, Н.Н. Лебедева // Сахар. – 2021. – № 8. – С. 34–39.

78. Никулина, О. К. Коррекция минерального состава полупродуктов сахарного производства с использованием электродиализа / О.К. Никулина,

М.Р. Яковлева, О.В. Колоскова, О.В. Дымар // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2020. – Т. 13. – №. 2. – С. 27–35.

79. Пат. 2181774 Российская Федерация, МПК С13 F3/00, С13 F1/00, С13 F5/00. Способ производства гранулированного сахаросодержащего продукта / Ананских В.В., Лукин Н.Д.; патентообладатель: Всероссийский научноисследовательский институт крахмалопродуктов. - № 2000132520/13; заявл. 26.12.2000; опубл. 27.04.2002, Бюл. № 36. – 6 с.

80. Пат. 2332468 Российская Федерация, МПК С13/F 3/00; С13F 1/02. Способ получения гранулированного сахара с добавками / Ананских В.В., Лукин Н.Д.; патентообладатель: ГНУ Всероссийский научноисследовательский институт крахмалопродуктов. - № 2006146749/13; заявл. 28.12.2006; опубл. 27.08.2008, Бюл. № 24. – 4 с.

81. Пат. №2480527 Российская Федерация, МПК С13В 30/02. Способ получения затравочной суспензии для уваривания утфеля / Славянский А.А., Семенов Е.В., Карамзин А.В., Лебедева Н.Н.: патентообладатель Славянский А.А. – №2011152052/13; заявл. 21.12.2011; опубл. 27.04.2013, Бюл. №12. – 5 с.

82. Пат. 2752141 Российская Федерация, МПК С13В 50/00. Способ получения гранулированного сахаросодержащего продукта для спортивного питания / Иванова А.А., Славянский А.А., Коптева А.А., Митрошина Д.П.; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)». – № 2020125129; заявл. 29.07.2020; опубл. 23.07.2021, Бюл. № 21. – 6 с.

83. Пат. 2757119 Российская Федерация, МПК С13В 30/02. Способ получения утфеля первой кристаллизации / Славянский А.А., Черемисина А.Ю., Федоткин И.О., Митрошина Д.П., Лебедева Н.Н.; патентообладатели: Славянский А.А., Черемисина А.Ю., Федоткин И.О., Митрошина Д.П., Лебедева Н.Н. – №2020141087; заявл. 14.12.2020; опубл. 11.10.2021, Бюл. № 29. – 7 с.

84. Пат. 2758295 Российская Федерация, МПК С13В 30/10. Способ разделения утфеля первой кристаллизации сахарного производства /

Славянский А.А., Черемисина А.Ю., Митрошина Д.П., Лебедева Н.Н.; патентообладатели: Славянский А.А., Черемисина А.Ю., Митрошина Д.П., Лебедева Н.Н. – № 2020141088; заявл.14.12.2020; опубл. 28.10.2021, Бюл. № 31. – 6 с.

85. Пат. 2759120 Российская Федерация, МПК С13В 30/00. Способ производства сахара / Славянский А.А., Митрошина Д.П., Лебедева Н.Н.; патентообладатели: Славянский А.А., Митрошина Д.П., Лебедева Н.Н. - № 2021108035; заявл. 25.03.2021; опубл. 09.11.2021, Бюл. № 31. – 8 с.

86. Пат. 2763505 Российская Федерация, МПК С13В 50/00. Способ производства гранулированного сахаросодержащего продукта / Курнатов Ю.В., Курнатов М.В., Славянский А.А., Митрошина Д.П.; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)». – №2021103316; заявл. 11.02.2021; опубл. 29.12.2021, Бюл. № 1. – 6 с.

87. Пат. 2763788 Российская Федерация, МПК С13В 30/00. Способ производства кристаллического белого сахара / Славянский А.А., Митрошина Д.П., Лебедева Н.Н.; патентообладатели: Славянский А.А., Митрошина Д.П., Лебедева Н.Н. - № 2021108036; заявл. 25.03.2021; опубл. 11.01.2022, Бюл.№ 2. – 7 с.

88. Пат. 2771067 Российская Федерация, МПК С13В 30/10. Способ разделения утфеля первой кристаллизации в фильтрующей центрифуге периодического действия / Славянский А.А., Митрошина Д.П., Черемисина А.Ю., Бычкова Т.С.; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)». – № 2021114460; заявл. 21.05.2021; опубл. 26.04.2022, Бюл.№ 12. – 7 с.

89. Пат. 2771068 Российская Федерация, МПК С13В 30/10. Способ разделения утфеля I кристаллизации в силовом центробежном поле / Славянский А.А., Митрошина Д.П., Бычкова Т.С.; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и

управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)». - № 2021114459; заявл. 21.05.2021; опубл. 26.04.2022, Бюл. № 12. – 7 с.

90. Пат. 2771069 Российская Федерация, МПК С13В 30/00. Способ интенсификации уваривания утфеля первой кристаллизации / Славянский А.А., Митрошина Д.П., Семенов Е.В., Лебедева Н.Н.; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)». – № 2021114457; заявл. 21.05.2021; опубл. 26.04.2022, Бюл. №12. – 8 с.

91. Пат. 2774422 Российская Федерация, МПК С13В 50/00. Способ производства гранулированного сахаросодержащего продукта / Курнатов Ю.В., Николаева Н.В., Курнатов М.В., Славянский А.А., Митрошина Д.П.; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)». - № 2021134692; заявл. 26.11.2021; опубл. 21.06.2022, Бюл.№18. – 6 с.

92. Пат. 2774428 Российская Федерация, МПК С13В 50/00. Способ производства гранулированного сахаросодержащего продукта / Курнатов Ю.В., В.А. Грибкова, М.В. Курнатов, А.А. Славянский, Д.П. Митрошина; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)». – № 2021134691; заявл. 26.11.2021; опубл. 21.06.2022, Бюл.№18. – 6 с.

93. Пат. 2795978 Российская Федерация, МПК С13В 30/00. Способ получения затравочной суспензии / Митрошина Д.П., Славянский А.А., Лебедева Н.Н.; патентообладатель: «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)». - № 2022107421; заявл. 22.03.2022; опубл. 15.05.2023, Бюл.№ 14. – 6 с.

94. Петров, С. М. Рост осциллирующих кристаллов сахара в растворах низкой чистоты / С.М. Петров, Н.М. Подгорнова // Сахар. – 2023. – № 1. – С. 44–48.

95. Петров, С.М. Оценка технологических возможностей расширения ассортимента кристаллического сахара / С.М. Петров, Н.М. Подгорнова, В.И. Тужилкин // Сахар. – 2022. – № 8. – С. 27–31.
96. Петров, С.М. Повышение качества свекловичного сахара до экспортного уровня / С.М. Петров, Н.М. Подгорнова, В.И. Тужилкин, СЛ. Филатов // Сахар. – 2017. – № 5. – С. 30–33.
97. Поливанова, Т. В. Оптимизация технологического процесса сушки и охлаждения сахара в сахарном производстве / Т.В. Поливанова, Н.Е. Семичева, С.А. Рябцева // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2020. – № 4(1028). – С. 57–59.
98. Полянский, К.К. Кристаллизация лактозы: физико-химические основы / К.К. Полянский, А.Г. Шестов. – Воронеж: ВГУ, 1995. – 186 с.
99. Попов, В.Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы / В.Д. Попов. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 320 с.
100. Пронина, В.А. Исследование качества сахара-песка как сырья для кондитерского производства / В.А. Пронина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. - 2012. - № 2-1. - С. 237-240.
101. Распоряжение Правительства РФ от 29 июня 2016 г. № 1364-р "Об утверждении "Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года" // Собрание законодательства РФ. - 2016. - № 28. - Ст. 4758.
102. Решетова, Р.С. Способы повышения эффективности работы кристаллизационного отделения сахарных заводов / Р.С. Решетова, О.Ю. Бганцева, Д.Н. Пешкова // Сахар. – 2019. – № 11. – С. 16–20.
103. Сапронов, А.Р. Технология сахарного производства / А.Р. Сапронов. – М: Колос, 1999. – 500 с.

104. Сапронова, Л. А. Способы повышения качества кристаллического сахара / Л. А. Сапронова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2017. – № 5. – С. 9–14.

105. Сапронова, Л.А. Совершенствование технологии кристаллизации сахара на основе исследования физико-химических свойств сахаросодержащих растворов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.05 / Сапронова Людмила Алексеевна. – М., 2001. – 424 с.

106. Семенов, Е. В. Оценка влияния термодинамического фактора на процесс кристаллизации в вакуум-аппарате / Е. В. Семенов, А. А. Славянский, В. А. Грибкова, Д.П. Митрошина, Н.Н. Лебедева // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2021. – № 5-6(383-384). – С. 42–47.

107. Семенов, Е.В. Количественное моделирование технологических инноваций в перерабатывающих производствах АПК / Е.В. Семенов, А.В. Карамзин, В.А. Карамзин, А.А. Славянский. – М.: «Спутник+», 2012. – 224 с.

108. Семенов, Е.В. Особенности диффузионного процесса кристаллизации сахарозы / Е. В. Семенов, А. А. Славянский, Е. А. Сергеева, Т. А. Щитова // Сахар. – 2013. – № 3. – С. 46–50.

109. Семенов, Е.В. Влияние термодинамического фактора на процесс кристаллизации сахарозы / Е.В. Семенов, А.А. Славянский, Д.П. Митрошина, В.А. Грибкова // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2023. – № 1(391). – С. 79–84.

110. Серегин, С.Н. Рынок сахаристых продуктов: возможности и границы роста / С.Н. Серегин, Н.Д. Лукин // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2022. – № 8. – С. 9–17.

111. Сидоренко, М. Ю. Научное обоснование принципов проектирования состава и потребительских характеристик продуктов персонализированного питания (том 1): специальность 05.18.15 "Технология и товароведение пищевых продуктов и функционального и специализированного назначения и общественного питания": диссертация на

соискание ученой степени доктора технических наук / Сидоренко Михаил Юрьевич. – Москва, 2013. – 374 с.

112. Сидоренко, Ю.И. Оценка содержания внутримолекулярной влаги крахмала пшеницы методом ДСК / Ю.И. Сидоренко, С.Л. Белецкий, В.В. Лоозе и др. // Основные направления развития технологии глубокой переработки крахмалсодержащего и инулинсодержащего сырья: Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Люберцы, Красково, Московская область, 22 сентября 2022 года. – Люберцы, Красково, Московская область: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха", 2022. – С. 183–188.

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

114. Сиренко, С.И. Термодинамическое уравнение зарождения центров кристаллизации сахара / С.И. Сиренко, И.Г. Бажал // Пищевая промышленность. — Киев: «Техника», 1968. - №4. - С.205–212.

115. Славянский, А. А. Сахар-песок как сырье для производства карамели / А.А. Славянский, С.В. Штерман, З.Г. Скобельская // Кондитерское производство. – 2001. – № 1. – С. 14–16.

116. Славянский, А.А. Влияние физических и технологических факторов на разделение утфелей сахарного производства / А.А. Славянский, Н.Н. Роева, О.И. Кутина // Сахар, 2008. – С. 49–53.

117. Славянский, А.А. Зольные элементы в кристаллах сахара-сырца / А.А. Славянский, А.Р. Сапронов, И.А. Балужева // Пищевая промышленность. – 1980. – № 8. – С. 48–50.

118. Славянский, А.А. Нерастворимые примеси и качество сахара-песка / А.А. Славянский, И.А. Балужева, А.Р. Сапронов // Пищевая промышленность. – 1990. – № 8. – С. 34–36.

119. Славянский, А.А. Основные несахара и технологические возможности их удаления при уваривании утфеля I кристаллизации / А.А.

Славянский, А.Н. Горина, М.И. Егорова, А.В. Кочеткова // Сахар. – 2009. - №9. – С. 33–40.

120. Славянский, А.А. Оценка качества сахара-песка и технологические мероприятия по обеспечению его стандартности: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.05 / Славянский Анатолий Анатольевич. – М., 1974. – 172 с.

121. Славянский, А.А. Повышение выхода и качества сахара в продуктовом отделении сахарного завода / А.А. Славянский, С.П. Гольденберг, М.Б. Мойсеяк. – М.: МГУПП, 2009. – 172 с.

122. Славянский, А.А. Промышленное производство сахара / А. А. Славянский. – М.: ООО "Русайнс", 2021. – 396 с.

123. Славянский, А.А. Совершенствование технологии очистки сахаросодержащих растворов, кристаллизации и центрифугирования с целью повышения выхода и качества сахара-песка: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.05 / Славянский Анатолий Анатольевич. – М., 1992. – 51 с.

124. Славянский, А.А. Фракционирование сыпучих пищевых продуктов / А. А. Славянский, Д. П. Митрошина, В. А. Грибкова, А. В. Карамзин // Техника и технология пищевых производств. – 2022. – Т. 52. – № 1. – С. 89–97.

125. Славянский, А.А. Центрифугирование и его влияние на выход и качество сахара / А.А. Славянский. – М.: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет пищевых производств".

126. Славянский, А. А. Разработка гранулированных антиоксидантных продуктов на основе сахарозы / А.А. Славянский, Д.П. Митрошина, В.А. Грибкова // Сахар. – 2022. – № 10. – С. 30–39.

127. Сотников, В. А. «Бета-кристалл» - суспензия инкапсулированных затравочных кристаллов / В. А. Сотников, Т. Р. Мустафин // Сахар. – 2023. – № 4. – С. 14–19.

128. Степаненкова, Н.М. Современное состояние свеклосахарного подкомплекса АПК российской федерации и проблемы ценообразования на рынке сахара / Н.М. Степаненкова // Актуальные вопросы современной экономики. - 2021. - № 2. - С. 346–354.

129. Странский, И.Н. К теории расчета кристаллообразования кристаллических зародышей / И.Н. Странский, Р. Кашиев // Успехи физических наук. – 1939. – Вып. 4. – С. 21.

130. Сущенко, А.К. Анализ процесса роста кристаллов в вакуум-аппарате периодического действия / А.К. Сущенко, Т.П. Гришагина, В.А. Карпенко // Сахарная промышленность.- 1987. - № 10. – С. 26–29.

131. Сущенко, А.К. Кристаллическая основа в технологическом процессе уваривания утфеля / А.К. Сущенко, Т.И. Моргун, А.Н. Савич // Сахар.- 2002. № 4. -С.54–55.

132. Тарасова, Е.А. Применение ЯМР спектроскопии для оценки состояния воды в кристаллах сахара-песка при хранении / Е.А. Тарасова, К.Б. Гурьева, В.И. Привалов, Ю.И. Сидоренко // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. – 2015. – № 3(3). – С. 303–315.

133. Тарасова, Е.А. Развитие сахарной отрасли по направлению эффективного взаимодействия с потребителями / Е.А. Тарасова, К.Б. Гурьева, А.А. Славянский, Н.Н. Лебедева, Д.П. Митрошина // Сахар. – 2021. – № 9. – С. 30–34.

134. Тарасова, Е.А. Совершенствование технологии получения утфеля I кристаллизации в зависимости от качества сырья: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.05 / Тарасова Евгения Александровна. – М., 2006. – 178 с.

135. Тарасова, Е.А. Развитие национальной инфраструктуры качества в области сахарной промышленности / Е.А. Тарасова, К.Б. Гурьева, А.А. Славянский, Н.Н. Лебедева, Д.П. Митрошина // Сахар. – 2021. – № 5. – С. 20–23.

136. Требования к качеству сахара-песка и сахара-рафинада фирм Master Food от 24.09.94 г. и Mars от 27.03.95 г. (ICUMSA GS2 – 11; GS2 – 19; GS2 – 33 и др.).

137. Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции», утвержден 09.12.2011.

138. Тужилки, В.И. Новые технологии кристаллизации сахарозы / В.И. Тужилкин, М.Г. Балыхин, Н.Д. Лукин, В.А. Коваленок // Достижения науки и техники АПК. – 2018. – Т. 32. – № 12. – С. 82–85.

139. Тужилкин, В.И. Кристаллизация сахара / В.И. Тужилкин. – М.: МГУПП, 2007. – 384 с.

140. Указ Президента РФ от 21.01.2021 №20 "Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации" // Собрание законодательств РФ. - 2020. - №4. - Ст. 345.

141. Филатов, С. Л. Об использовании slurry как аналога маточного утфеля для полной заводки кристаллов при уваривании первого продукта / С.Л. Филатов, С.М. Петров, Н.М. Подгорнова, Р.А. Шрамко, В.М. Думченков, Р.Ф. Ахунова, Р.Н. Белинский //Сахар. – 2022. – №. 12. – С. 38–44.

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

143. Федеральный закон от 02.01.2000 «О качестве и безопасности пищевых продуктов» (ред. от 01.01.2022).

144. Хамский, Е.В. Кристаллизация в химической промышленности / Е.В. Хамский. – М.: Химия, 1979. – 342 с.

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

146. Хамский, Е.В. Пересыщенные растворы / Е.В. Хамский. – Л.: Наука, 1975. – 100 с.

147. Хворова, Л.С. Трехпродуктовая технологическая схема получения глюкозы с кристаллизацией двух продуктов в ангидридной форме / Л.С. Хворова // Пищевая промышленность. – 2017. – № 9. – С. 44–46.

148. Хворова, Л. С. Исследование со-кристаллизации глюкозы с хлоридом натрия / Л. С. Хворова, Н. Р. Андреев, Л. В. Баранова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2020. – № 5. – С. 67–71.

149. Хониг, П. Принципы технологии сахара / П. Хониг. – М.: Пищевая промышленность, 1965. – 515 с.

150. Чернявская, Л.И. Мутность растворов сахара и методы ее уменьшения / Л.И. Чернявская, В.Н. Кухар // Сахар. – 2014. – №3. – С. 38–45.

151. Чугунов, С.А. Интенсификация процесса кристаллизации сахарозы свеклосахарного производства / С.А. Чугунов, В.Н. Базлов, И.А. Авилова, А.Г. Беляев, А.Г. Петрова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – № 1(14). – С. 107–111.

152. Чудаков, Г.М. Разработка фильтрующих центрифуг / Г.М. Чудаков, М.Г. Иванов //Электронный сетевой политематический журнал " Научные труды КубГТУ". – 2015. – №. 5. – С. 244–269.

153. Штангеев, В.О. Затравочная паста «Магмас» - повышение эффективности работы продуктовых отделений / В.О. Штангеев, А.К. Сущенко, А.Ф. Гуцол, А.В. Власенко, В.Г. Мирончук // Сахар. - 2002. - № 4. – С.52–53.

154. Штангеев, В.О. Исследование влияния принудительного колебания температуры на рекристаллизацию с целью интенсификации процесса уваривания сахарных utfелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.05 / Штангеев Валерий Остапович. – Киев, 1976. – 23 с.

155. Штангеев, В.О. Современные технологии и оборудование свеклосахарного производства: Часть 2 / В.О. Штангеев, В.Т. Кобер, Л.Г. Белостоцкий, Н.И. Штангеева, В.А. Лагода, В.А. Шестаковский – Киев: Цукор України, 2004. – 320 с.

156. Штангеев, К.О. Теплотехнические и технологические аспекты совершенствования продуктового отделения свеклосахарного завода / К.О. Штангеев, К.Д. Скорик, Н.И. Штангеева // Сахар. – 2021. – №. 12. – С. 20–25.

157. Штерман, С.В. Анализ и обоснование технологических показателей основного сырья для производства карамели: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.05 / Штерман Сергей Валерьевич. – М., 2002. – 24 с.

158. Штерман, С.В. Качественные характеристики сахара-песка для кондитерского производства / С.В. Штерман, В.С. Штерман, Н.В. Осташенкова, М.Е. Ткешелашвили, И.А. Кондакова, О.В. Холина // Сахар. – 2009. – № 3. – С. 46–52.

159. Штерман, С.В. Пенение и пути его устранения в производстве карамели / С.В. Штерман, А.А. Славянский, Г.А. Вовк // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – № 7. – С. 17–20.

160. Штерман, С.В. Обобщенное расстояние между частицами при кристаллизации из растворов / С.В. Штерман, Л.А. Каплин, В.И. Тужилкин, А.Н. Филиппов // Сахар. – 2010. – № 6. – С. 54–59.

161. Шумовецкий, Г.А. Получение затравочного утфеля охлаждающей кристаллизацией: заводские испытания / Г.А. Шумовецкий // Сахар. – 2009. – № 1. – С. 39–45.

162. Яровой, А.А. Внедрение прогрессивной универсальной трёхкристаллизационной схемы продуктового отделения на сахарных заводах концерна "Покровский" / А.А. Яровой, А.И. Демченко, В.Н. Усатый, Ю.А. Стешенко // Сахар. – 2018. – № 2. – С. 34–37.

163. Bajaj, S. R., & Singhal, R. S. (2021). Enhancement of stability of vitamin B12 by co-crystallization: A convenient and palatable form of fortification. *Journal of Food Engineering*, 291.

164. Bojòanská T. et al. Process of obtaining of sugar from sugar beet and influence on its quality //Potravinarstvo: Scientific Journal for Food Industry. – 2011. – Т. 5. – №. 1. – С. 1–4.

165. Chezanoglou, E., & Goula, A. M. (2021, August 1). Co-crystallization in sucrose: A promising method for encapsulation of food bioactive components. *Trends in Food Science and Technology*. Elsevier Ltd.

166. Christian Moller. Sugar boiling theory and practice. // International Sugar Journal.- 1983. – T. 85. – № 1014. – P. 163–165.

167. Eszterle M. Viscosity and molecular structure of pure sucrose solution //Zuckerindustrie. – 1990. – №4. – P. 263 –267.

168. Hartel, R.W. Crystallization kinetics for the sucrose-water system / R.W. Hartel, K.A. Berglund, S.M. Crynn // Control and Analysis of crystallization process, – 1980. – Bd. 76. – P. 65–72.

169. Hazervazifeh A. et al. Energy economy and kinetic investigation of sugar cube dehydration using microwave supplemented with thermal imaging //Journal of Food Processing and Preservation. – 2018. – T. 42. – №. 2. – P. E13504

170. Heffels, S.K. Growth rate of small sucrose crystals at 70 °C / S.K. Heffels, E.J. Jong, D.J. Sinke // Zuckerindustrie. – 1987. – V. 112. – № 6. – P. 511–518.

171. Heffels, S. K. Effect of nuclei storage and growth rate dispersion on the transient behaviour of continuous crystallizers / Heffels S.K., E.J. Jong //Chemical engineering & technology. – 1990. – T. 13. – №. 1. – P. 63–71.

172. Heffels, S.K. Modelling sucrose crystals growth / S.K. Heffels, E.J. Jong // Zuckerindustrie. – 1988. – V. 133. – № 9. – P. 781–786.

173. Irigoiti Y., Yamul D. K., Navarro A. S. Co-crystallized sucrose with propolis extract as a food ingredient: Powder characterization and antioxidant stability //LWT. – 2021. – T. 143. – P. 111164.

174. Karangutkar A. V., Ananthanarayan L. Co-crystallization of Basella rubra extract with sucrose: Characterization of co-crystals and evaluating the storage stability of betacyanin pigments //Journal of Food Engineering. – 2020. – T. 271. – P. 109776.

175. Lu Y. et al. Impact of sucrose crystal composition and chemistry on its thermal behavior //Journal of Food Engineering. – 2017. – T. 214. – P. 193-208.

176. Milner D. Magma mixing and melting type continuous centrifugals //Sugar Journal. – 1991. – №1116. – 256 p.

177. Pautrat C., Senotelle J., Matholouthi M. Growth crystal sucrose at affect impurities //International Sugar Journal. – 1996. – №137. – P.101–109.

178. Pezzi, G. Numerical methods for calculations of sugar grain size distribution / G. Pezzi, V. Maurendi // Zuckerindustrie. – 1993. – V. 118. – № 2. – P. 113–123.

179. Pohl P. Elemental Composition of White Refined Sugar by Instrumental Methods of Analysis / Pohl P., Stecka H. // Critical Reviews in Analytical Chemistry. – 2011. – V. 41, I.2. – P. 100–113.

180. Pohl P. Solid phase extraction with flame atomic absorption spectrometry for determination of traces of Ca, K, Mg and Na in quality control of white sugar / Pohl P., Stecka H., Jamroz P. // Food Chemistry. – 2012. – V. 130, I. 2. – P. 441–446.

181. Pohl P., Stecka H. Elemental composition of white refined sugar by instrumental methods of analysis //Critical Reviews in Analytical Chemistry. – 2011. – T. 41. – №. 2. – P. 100–113.

182. Quast L. B. et al. Co-crystallized honey with sucrose: Evaluation of process and product characterization //Journal of Food Processing and Preservation. – 2020. – T. 44. – №. 11. – P. e14876.

183. Rai, K., Chhanwal, N., Shah, N. N., & Singhal, R. S. (2021). Encapsulation of ginger oleoresin in co-crystallized sucrose: Development, characterization and storage stability. Food and Function. – 12(17). – P.7964–7974.

184. Rao G. P., Singh P. Value addition and fortification in non-centrifugal sugar (jaggery): A potential source of functional and nutraceutical foods //Sugar Tech. – 2022. – T. 24. – №. 2. – P. 387–396.

185. Ronda F. et al. Direct determination of arsenic, cadmium, cobalt, copper, chromium, lead, tin and zinc in white beet sugar using graphite furnace atomic absorption spectrophotometry //Zuckerindustrie. – 2001. – T. 126. – №. 3. – P. 208–212.

186. Sarabandi K., Mahoonak A. S., Akbari M. Physicochemical properties and antioxidant stability of microencapsulated marjoram extract prepared by co-

crystallization method //Journal of Food Process Engineering. – 2019. – T. 42. – №. 1. – P. e12949.

187. Sardar B. R., Singhal R. S. Characterization of co-crystallized sucrose entrapped with cardamom oleoresin //Journal of Food Engineering. – 2013. – T. 117. – №. 4. – P. 521–529.

188. Schliephake D. Die Diffusion der Saccharose in wasseriger Losungen //Zucker. – 1965. – №18. – P. 138–142.

189. Schneider F., Emmerlich A., Tichmanis U. Uber den Wassergehalt von zucker //Zucker. – 1975. – Vol.28. – №11. – P. 606–615.

190. Semenov E.V. et al. Thermodynamic factor and vacuum crystallization. // Foods and Raw Materials. – 2022. – Vol. 10, No. 2. – P. 304–309.

191. Semenov, E. V. Quantitative Analysis of Suspension Clarification Process in Inter-Tray Space of Separator Drum / E. V. Semenov, A. A. Slavyanskiy, D.P. Mitroshina // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 57. – No 5-6. – P. 361–369.

192. Šereš Z. et al. Metal and polycyclic aromatic hydrocarbon content of products in sugar production/ //Sucrose: Properties, Biosynthesis and Health Implications. – 2013. – P. 1–34.

193. Sharief, M. The Parameters Affecting the Process of Sugar Drying- Assalaya Sugar Factory-Sudan / Sharief M., Mohamed Y., Saad O. //Journal of Engineering Studies and Computer science. – 2022. – T. 1. – №. 1. – P. 49–56.

194. Siebert, Karl J. Effect of protein-Poliphenon Ratio on the Size of Haze Particles / Karl J. Siebert, P.Y. Lynn // Journal of the ASBC.- 2000. -v.58. -№ 3.- P.117–123.

195. ŠKRBIĆ B., ĐURIŠIĆ-MLADENović N., MAČVANIN N. Determination of metal contents in sugar beet (*Beta vulgaris*) and its products: empirical and chemometrical approach //Food science and technology research. – 2010. – T. 16. – №. 2. – P. 123–134.

196. Takeda K. et al. Physical stability of an amorphous sugar matrix dried from methanol as an amorphous solid dispersion carrier and the influence of heat

treatment //Journal of Pharmaceutical Sciences. – 2019. – T. 108. – №. 6. – P. 2056–2062.

197. Verma P. et al. Insights into the crystallization phenomenon in the production of non-centrifugal sugar //Journal of Food Engineering. – 2021. – T. 290. – P. 110259.

198. Yang L. et al. New value-added sugar and brown sugar products from sugarcane: a commercial approach //Sugar Tech. – 2020. – T. 22. – №. 5. – P. 853-857.

199. Zahar. Analisa microbiologica. – STAS 11499-81. – 8 p.

200. Zhao J. et al. NMR technique and methodology in botanical health product analysis and quality control //Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. – 2022. – T. 207. – P. 114376.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2757119

### СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ УТФЕЛЯ ПЕРВОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Патентообладатели: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU), Черемисина Анна Юрьевна (RU), Федоткин Илья Олегович (RU), Митрошина Дарья Петровна (RU), Лебедева Наталья Николаевна (RU)*

Авторы: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU), Черемисина Анна Юрьевна (RU), Федоткин Илья Олегович (RU), Митрошина Дарья Петровна (RU), Лебедева Наталья Николаевна (RU)*

Заявка № 2020141087

Приоритет изобретения 14 декабря 2020 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 октября 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 14 декабря 2040 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Налиев

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2758295

### СПОСОБ РАЗДЕЛЕНИЯ УТФЕЛЯ ПЕРВОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ САХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Патентообладатели: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU),  
Черемисина Анна Юрьевна (RU), Митрошина Дарья  
Петровна (RU), Лебедева Наталья Николаевна (RU)*

Авторы: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU),  
Черемисина Анна Юрьевна (RU), Митрошина Дарья  
Петровна (RU), Лебедева Наталья Николаевна (RU)*

Заявка № 2020141088

Приоритет изобретения 14 декабря 2020 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 28 октября 2021 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 14 декабря 2040 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Налиев*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2759120**

**СПОСОБ ПРОИЗВОДСТВА САХАРА**

Патентообладатели: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU),  
Митрошина Дарья Петровна (RU), Лебедева Наталья  
Николаевна (RU)*

Авторы: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU),  
Митрошина Дарья Петровна (RU), Лебедева Наталья  
Николаевна (RU)*

Заявка № 2021108035

Приоритет изобретения **25 марта 2021 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации **09 ноября 2021 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **25 марта 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2763788

### СПОСОБ ПРОИЗВОДСТВА КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО БЕЛОГО САХАРА

Патентообладатели: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU),  
Митрошина Дарья Петровна (RU), Лебедева Наталья  
Николаевна (RU)*

Авторы: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU),  
Митрошина Дарья Петровна (RU), Лебедева Наталья  
Николаевна (RU)*

Заявка № 2021108036

Приоритет изобретения 25 марта 2021 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 11 января 2022 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 25 марта 2041 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.И. Ивлиев

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2771067

### Способ разделения утфеля первой кристаллизации в фильтрующей центрифуге периодического действия

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)" (RU)*

Авторы: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU), Митрошина Дарья Петровна (RU), Черемисина Анна Юрьевна (RU), Бычкова Татьяна Сергеевна (RU)*

Заявка № 2021114460

Приоритет изобретения 21 мая 2021 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 26 апреля 2022 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 21 мая 2041 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2771068

### СПОСОБ РАЗДЕЛЕНИЯ УТФЕЛЯ I КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В СИЛОВОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)" (RU)*

Авторы: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU), Митрошина Дарья Петровна (RU), Бычкова Татьяна Сергеевна (RU)*

Заявка № 2021114459

Приоритет изобретения 21 мая 2021 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 26 апреля 2022 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 21 мая 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2771069

### СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ УВАРИВАНИЯ УТФЕЛЯ ПЕРВОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)" (RU)*

Авторы: *Славянский Анатолий Анатольевич (RU), Митрошина Дарья Петровна (RU), Семенов Евгений Владимирович (RU), Лебедева Наталья Николаевна (RU)*

Заявка № 2021114457

Приоритет изобретения 21 мая 2021 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 26 апреля 2022 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 21 мая 2041 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2774428

### Способ производства гранулированного сахаросодержащего продукта

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)" (RU)*

Авторы: *Курнатов Юрий Владимирович (RU), Грибкова Вера Анатольевна (RU), Курнатов Михаил Владимирович (RU), Славянский Анатолий Анатольевич (RU), Митрошина Дарья Петровна (RU)*

Заявка № 2021134691

Приоритет изобретения **26 ноября 2021 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации **21 июня 2022 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **26 ноября 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2795978**

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАТРАВОЧНОЙ  
СУСПЕНЗИИ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)" (RU)*

Авторы: *Митрошина Дарья Петровна (RU), Славянский Анатолий Анатольевич (RU), Лебедева Наталья Николаевна (RU)*

Заявка № 2022107421

Приоритет изобретения 22 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 15 мая 2023 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 22 марта 2042 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



**Некоммерческая организация Фонд «ПРОДИНДУСТРИЯ»  
Орган по сертификации продукции  
РОСС RU.0001.11ТМ04**

Юр.адрес: 123308, г. Москва, ул. Маршала Жукова, д.1  
Адрес местонахождения: 123308, г. Москва, ул. Мневники, д. 1, +7 (499) 191-15-24;  
e-mail: [fondprod@rambler.ru](mailto:fondprod@rambler.ru); [www.fondprod.ru](http://www.fondprod.ru)

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Генеральный директор

 В.А. Карамзин  
« 20 12 » г.

**АКТ**

**об оценке соответствия результатов диссертационного исследования**

ОС «ПРОДИНДУСТРИЯ» проведена оценка соответствия способов производства кристаллического белого сахара (Патент РФ № 2771069 «Способ интенсификации уваривания утфеля первой кристаллизации», Патент РФ № 2763788 «Способ производства кристаллического белого сахара», Патент РФ №2759120 «Способ производства сахара»), разработанных в ходе диссертационного исследования Митрошиной Дарьи Петровны требованиям нормативно-технической документации.

Отличительной особенностью разработанных способов является использование фракционирования методом сепарирования на сепараторе-очистителе марки А1-ОЦМ-5 затравочных кристаллов, используемых в качестве центров кристаллизации.

ОС «ПРОДИНДУСТРИЯ» подтверждает, что результаты диссертационного исследования Митрошиной Дарьи Петровны (Патент РФ № 2771069, Патент РФ № 2763788, Патент РФ №2759120) соответствуют требованиям нормативно-технической документации. Установлено, что разработанные способы производства кристаллического белого сахара позволяют увеличить выход сахара, а также повысить его качественные характеристики. ОС «ПРОДИНДУСТРИЯ» считает применение результатов диссертационного исследования Митрошиной Дарьи Петровны целесообразным на предприятиях сахарной промышленности.

Заместитель генерального  
директора НО Фонд «ПРОДИНДУСТРИЯ»,  
Руководитель ОС «ПРОДИНДУСТРИЯ»

 Новикова Г.Д.

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**  
**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ**  
**«АГРОМАШ»**

*Основан в 1992 г.*

Адрес местонахождения: 123308, г. Москва, ул. Мневники, д. 1, тел/факс +7(499) 191-15-24;  
 +7 (495) 784-66-35; Email: [oooagromash@rambler.ru](mailto:oooagromash@rambler.ru) сайт [oooagromash.ru](http://oooagromash.ru)

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Генеральный директор

ООО «АГРОМАШ»

В.А. Карамзин



2022 г.

**АКТ**

**о проведении производственных испытаний**

ООО «АГРОМАШ» подтверждает проведение производственных испытаний фракционирования затравочных кристаллов для заводки центров кристаллизации в сахарном утфеле (Патент № 2763788 С1 Российская Федерация, МПК С13В 30/00. Способ производства кристаллического белого сахара: № 2021108036: заявл. 25.03.2021; опубл. 11.01.2022 / А. А. Славянский, Д. П. Митрошина, Н. Н. Лебедева.).

Фракционирование проводили с применением сепаратора-очистителя марки АІ-ОЦМ-5 и выделением кристаллов размером 0,12 – 0,16 мм для заводки центров кристаллизации при уваривании утфеля І кристаллизации.

В ходе проведения производственных испытаний были сопоставлены основные технологические показатели заводки центров кристаллизации образованных по известному методу и при фракционировании методом сепарирования кристаллов сахара.

№ п/п	Показатели процесса получения белого сахара	Технология получения	
		Патент №2763788	Заводка центров кристаллизации сахарной пудрой
1.	Чистота утфеля, %:		
	в первом вакуум-аппарате	92,26	92,05
	во втором вакуум-аппарате	92,04	92,03
2.	Содержание сухих веществ, %		
	в первом вакуум-аппарате	92,25	92,20
	во втором вакуум-аппарате	92,50	92,25
3.	Выход кристаллов сахара из центрифуги, % к массе утфеля	50,90	49,50
4.	Физико-химические показатели качества белого сахара:	98,0	104,00

цветность, ед. опт. пл.		
Зола, %	0,027	0,003
Редуцирующие вещества, %	0,07	0,04
Гранулометрический состав:		
С <sub>p</sub> , мм	0,81	0,72
К <sub>n</sub> , %	22,00	24,00

Результаты испытаний подтвердили то, что заводка центров кристаллизации методом фракционирования кристаллов сахара сепарированием на сепараторе-очистителе марки AI-ОЦМ-5 является эффективной, поскольку она позволяет не только увеличить выход кристаллов сахара на 1,4 %, но и получить кристаллический белый сахар с более высокими качественными показателями

Комиссия считает целесообразным использование фракционирования затравочных кристаллов для заводки центров кристаллизации в утфеле на сахарных заводах для повышения выхода и качества кристаллического белого сахара.

Члены комиссии:

Заместитель генерального директора  
ООО «АГРОМАШ»



Г.Д. Новикова

Заведующий кафедрой  
инновационных технологий продуктов  
из растительного сырья



А.А. Славянский

Доцент кафедры  
инновационных технологий продуктов  
из растительного сырья



Н.Н. Лебедева

Аспирант кафедры  
инновационных технологий продуктов  
из растительного сырья



Д.П. Митрошина

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**  
**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ**  
**«АГРОМАШ»** Основан в 1992 г.

Адрес местонахождения: 123308, г. Москва, ул. Мневники, д. 1, тел/факс +7(499) 191-15-24;  
 +7 (495) 784-66-35; Email: oooagromash@rambler.ru сайт oooagromash.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «АГРОМАШ»

В.А. Карамзин

2022 г.



**АКТ**

**о проведении производственных испытаний**

ООО «АГРОМАШ» подтверждает проведение испытаний способа производства затравочной суспензии (заявка на изобретение РФ № 2022107421 от 22.03.2022 г., авторов: Митрошиной Д.П., Славянского А.А., Лебедевой Н.Н.), разработанную на кафедре инновационных технологий продуктов из растительного сырья МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ).

Данный способ предусматривает фракционирование методом сепарирования затравочной суспензии на сепараторе марки А1-ОЦМ-5 с выделением в жидкой фазе кристаллов сахара размером 0,05–0,10 мм и добавление в нее моноглицерида дистиллированного в количестве 0,0005–0,001% к массе затравочной суспензии. Кристаллы наращивают при температуре 70–74°C до достижения их размера 0,15–0,20 мм и содержания в суспензии в пределах 45–50%, после чего затравочную суспензию повторно сепарируют с выделением твердой фазы размером 0,15–0,18 мм и содержанием в готовой затравочной суспензии 35–45%.

Результаты сравнение качественных характеристик утфеля полученного с использование затравочной суспензии по разработанному и по известному способу представлены в таблице.

№ п/п	Показатели процесса получения белого сахара	С использованием затравочной суспензии:	
		По предлагаемому способу	По известному способу
1	Чистота утфеля, %		
	в первом вакуум-аппарате	91,80	92,50
	во втором вакуум-аппарате	91,65	92,00
2	Содержание сухих веществ, %	92,00	92,30
	в первом вакуум-аппарате	92,75	93,00

во втором вакуум-аппарате			
3	Выход кристаллов сахара из центрифуги, %	50,5	49,0
4	Физико-химические показатели белого сахара: цветность, ед. опт. плотности	95	104
	Зола, %	0,015	0,03
	Редуцирующие вещества, %	0,02	0,04
	Гранулометрический состав: Ср, мм К <sub>п</sub> , %	0,75 22,5	0,45 24,2

На основе производственных испытаний ООО «АГРОМАШ» считает рациональным применение способа производства затравочной суспензии на предприятиях сахарной промышленности, поскольку он позволяет повысить выход и качественные показатели кристаллического белого сахара.

Члены комиссии:

Заместитель генерального директора  
ООО «АГРОМАШ»

Г.Д. Новикова

Заведующий кафедрой  
инновационных технологий продуктов  
из растительного сырья  
МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

А.А. Славянский

Доцент кафедры  
инновационных технологий продуктов  
из растительного сырья  
МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

Н.Н. Лебедева

Аспирант кафедры  
инновационных технологий продуктов  
из растительного сырья  
МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

Д.П. Митрошина

«УТВЕРЖДАЮ»  
Менеджер по производству  
АО «Сахарный комбинат «Отрадинский»  
Приходько К.К.  
«17» ноября 2022 г.

АКТ  
производственной апробации изобретения  
«Способ производства сахара»  
на АО «Сахарный комбинат «Отрадинский»

Мы, нижеподписавшиеся, начальник смены Левшина Е.И., заведующий кафедрой инновационных технологий продуктов из растительного сырья МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ) Славянский А.А., доцент кафедры инновационных технологий продуктов из растительного сырья МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ) Лебедева Н.Н., аспирант кафедры инновационных технологий продуктов из растительного сырья МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ) Митрошина Д.П. составили настоящий акт по результатам производственной апробации изобретения «Способ производства сахара» (Патент № 2759120 С1 Российская Федерация, МПК С13В 30/00. Способ производства сахара: № 2021108035: заявл. 25.03.2021; опубл. 09.11.2021 / А. А. Славянский, Д. П. Митрошина, Н. Н. Лебедева), разработанного на кафедре инновационных технологий продуктов из растительного сырья МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ).

Способ получения сахара отличается от типовой технологии тем, что для заправки центров кристаллизации используют маточный utfель, прошедший предварительное фракционирование с использованием сепаратора марки А1-ОЦМ-5 до содержания кристаллов сахара размером 0,160-0,200 мм, которые затем наращивают на подкачках смеси сиропа с клеровкой концентрацией 65-75% сухих веществ, выдерживая расстояние между кристаллами в диапазоне

$1,5 \times 10^{-4}$ - $2,5 \times 10^{-4}$  м с вводом по мере необходимости на раскачивание утфеля фильтрованного сока II сатурации до содержания в утфеле 91,0-91,5% сухих веществ. Затем часть этого утфеля отбирают во второй вакуум-аппарат в смеси с сиропом и клеровкой, после чего утфель в первом аппарате уваривают до готовности. Утфель из второго вакуум-аппарата перед центрифугированием на центрифуге ФПН-125 1Т раскачивают первым оттеком из первого вакуум-аппарата. Далее кристаллы сахара промывают озонированной водой и выгружают из центрифуги влажностью 0,8-1,5%.

В результате экспериментов комиссия установила, что предложенный способ производства сахара по сравнению с известным обеспечивает увеличение выхода кристаллов сахара на 1% к массе утфеля, а также позволяет повысить качественные показатели сахара и снизить его потери на 0,02 - 0,03% к массе утфеля.

На основании проведенных испытаний комиссия считает изобретение «Способ производства сахара» (Патент № 2759120) эффективным для повышения выхода и качества сахара и целесообразным для использования на сахарных заводах.

Начальник смены  
АО «Сахарный комбинат «Отрадинский»  Левшина Е.И.

Заведующий кафедрой  
инновационных технологий  
продуктов из растительного сырья  
МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)  Славянский А.А.

Доцент кафедры  
инновационных технологий  
продуктов из растительного сырья  
МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)  Лебедева Н.Н.

Аспирант кафедры  
инновационных технологий  
продуктов из растительного сырья  
МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)  Митрошина Д.П.

«УТВЕРЖДАЮ»

Менеджер по производству

АО «Сахарный комбинат «Отрадинский»

Приходько К.К.



## АКТ

проведения испытаний

способа производства кристаллического белого сахара

АО «Сахарный комбинат «Отрадинский» подтверждает проведение испытаний способа производства кристаллического белого сахара (Патент № 2763788 С1 Российская Федерация, МПК С13В 30/00. Способ производства кристаллического белого сахара: № 2021108036: заявл. 25.03.2021; опубл. 11.01.2022 / Славянский А.А., Митрошина Д.П., Лебедева Н.Н.).

Отличительной особенностью данного способа является то, что в качестве центров кристаллизации используют кристаллы сахара образованные самопроизвольно по Брауншвейгскому методу и фракционированные методом сепарирования до размеров 0,12 – 0,16 мм на сепараторе марки А1-ОЦМ-5. Подготовленные кристаллы смешивают с сиропом и подают в первый вакуум-аппарат, где их наращивают при пересыщении 1,12-1,17 до размера 0,2-0,3 мм. Затем 30 – 40% утфеля отбирают и подают во второй вакуум-аппарат в смеси с сиропом и клеровкой. Утфель во втором вакуум-аппарате уваривают до содержания в нем 92,0 – 92,5% сухих веществ. После отбора из первого вакуум-аппарата части утфеля его раскачивают сиропом с клеровкой и уваривают при пересыщении 1,12-1,15 до содержания в нем 92,0-92,5% сухих веществ.

Экспериментальные исследования показали, что способ производства кристаллического белого сахара (Патент № 2763788 С1 Российская

Федерация, МПК С13В 30/00. Способ производства кристаллического белого сахара: № 2021108036: заявл. 25.03.2021; опубл. 11.01.2022 / Славянский А.А., Митрошина Д.П., Лебедева Н.Н.) по сравнению с типовой технологией позволяет повысить выход кристаллического белого сахара, причем получаемый при этом сахар имеет более высокие показатели качества.

Председатель комиссии:

 Левшина Е.И.

Члены комиссии:

 Славянский А.А.

 Лебедева Н.Н.

 Митрошина Д.П.

«УТВЕРЖДАЮ»

Менеджер по производству  
АО «Сахарный комбинат «Отрадинский»

  
Приходько К.К.  
«14» ноября 2022г

### АКТ

внедрения на АО «Сахарный комбинат «Отрадинский» комплексной  
технологии уваривания утфеля I кристаллизации

АО «Сахарный комбинат «Отрадинский» подтверждает внедрение комплексной технологии, разработанной на основе новых способов уваривания утфеля I кристаллизации (Патент РФ № 2757119, Патент РФ №2763788, Патент РФ № 2759120, Патент РФ №2771069).

Предлагаемая технология обеспечивает более высокий эффект кристаллизации сахарозы, при этом уменьшается чистота мелассы, сокращается время уваривания утфеля, улучшаются физико-химические и гранулометрические показатели качества кристаллического белого сахара.

В результате экспериментов комиссия установила эффективность комплексной технологии уваривания утфеля I кристаллизации и считает целесообразным ее использование на сахарных заводах.

Председатель комиссии:

 Левшина Е.И.

Члены комиссии:

 Славянский А.А.

 Лебедева Н.Н.

 Митрошина Д.П.



Московский государственный  
университет технологий и управления  
им. К.Г. Разумовского (ПТУ)



ВУЗ НИИ  
НОВОТЕХ



Московский государственный  
университет технологий и управления  
им. К.Г. Разумовского (ПТУ)



\* XIII Всероссийский форум молодых ученых и студентов  
**«Дни студенческой науки»**

# ДИПЛОМ

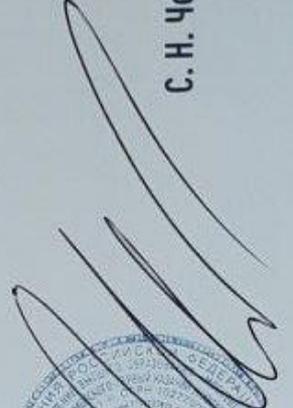
III СТЕПЕНИ  
НАГРАЖДАЕТСЯ

**Митрошина Дарья Петровна**

ЛАУРЕАТ ПЛЕНАРНОГО ЗАСЕДАНИЯ



Врио ректора МГУТУ  
имени К. Г. Разумовского (ПКУ),  
Д.ф.-м.н., профессор



С. Н. Чеботарев



# СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

Международной научной конференции  
молодых ученых и специалистов,  
посвященной 135-летию  
со дня рождения А.Н. Костякова

Выдан

**Митрошина Дарья Петровна**

за доклад на тему:

Проблемы подготовки затравочных кристаллов для уваривания утфеля I кристаллизации

на секции

Актуальные вопросы пищевых технологий и управление качеством



*В.И. Трухачев*



РГАУ-МСХА  
имени К.А. Тимирязева

Москва, 6-8 июня 2022 г.



/ В.И. Трухачев  
Ректор,  
Академик РАН,  
профессор



# ДИПЛОМ

награждается

**Дарья Петровна Митрошина,**

ассистент ФГБОУ ВО «Московский государственный  
университет технологий и управления  
им. К.Г. Разумовского (ПКУ)»

за профессионализм в подготовке научных работ  
на конкурс «Актуальные вопросы качества и безопасности  
продовольственного сырья, кулинарной продукции,  
хлебопекарных и кондитерских производств», проводимого  
в рамках Форума сельских пекарей России  
**11-13 октября 2022 года**

Президент  
Гильдии пекарей и кондитеров  
Московской области, д.т.н.,  
профессор



А.Т. Васюкова