

И.Ю. Голованов М.А. Угольникова В.В. Чернявская

**Технология кристаллизации
и перспективы ее развития**

Москва – 2026

УДК 66.974.434
ББК 65.2/4
Г 61

Рецензенты:

Таран Юлия Александровна – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И., МИРЭА – Российский технологический университет;

Некрасов Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Техника низких температур имени П.Л. Капицы», Московский политехнический университет.

Голованов, Иван Юрьевич

Угольникова, Мария Андреевна

Чернявская, Варвара Васильевна

Г 61 **Технология кристаллизации и перспективы ее развития.** Монография – М.: Мир науки, 2026 г. – Сетевое издание. Режим доступа: <https://izd-mn.com/PDF/54MNNPM26.pdf> – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-908127-53-0

DOI: 10.15862/54MNNPM26

В монографии представлены современные методы, области применения, основные ограничения и перспективные направления развития технологии кристаллизации, применяемой во многих отраслях промышленности, включая химическую, пищевую и биотехнологическую.

Монография предназначена для обучающихся и работников учреждений, связанных с исследованием, разработкой и эксплуатацией аппаратного оформления химико-технологических, пищевых, биотехнологических и других производств, включающих процесс кристаллизации.

Издание распространяется под лицензией Creative Commons CC BY 4.0

ISBN 978-5-908127-53-0

© Голованов Иван Юрьевич
© Угольникова Мария Андреевна
© Чернявская Варвара Васильевна
© ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 2026 г.
© ООО Издательство «Мир науки», 2026 г.

Оглавление

Введение	5
Список сокращений и условных обозначений	8
Глава 1. Современное состояние технологии кристаллизации	9
1.1. Место кристаллизационного разделения в современных технологиях обработки жидких сред	9
1.2. Физико-химические основы избирательной кристаллизации растворителя	11
1.3. Материальный и тепловой баланс процесса разделительного вымораживания.....	12
1.4. Классификация технологических схем и кристаллизаторов	13
1.5. Современные конструктивные решения кристаллизаторов	15
1.5.1. Емкостные слоевые кристаллизаторы.....	15
1.5.2. Барабанные и чешуйчатые кристаллизаторы непрерывного действия.....	15
1.5.3. Кристаллизаторы с формированием суспензии	16
1.5.4. Многоступенчатые и каскадные установки.....	17
1.6. Сепарирование льда и обеспечение селективности процесса	18
1.7. Параметры режима и управление процессом.....	19
1.8. Энергетическая и эксергетическая эффективность	20
1.9. Промышленное применение технологии низкотемпературного разделения.....	21
1.9.1. Концентрирование соков	21
1.9.2. Молоко и молочная сыворотка	22
1.9.3. Очистка и опреснение воды	23
1.9.4. Химические, биотехнологические и специальные среды	23
1.10. Моделирование, расчет и масштабирование кристаллизаторов	24
1.11. Ограничения существующих технологий и направления развития.....	25
1.12. Выводы по главе 1.....	27
Глава 2. Направления совершенствования кристаллизаторов	29
2.1. Критерии и показатели совершенствования кристаллизаторов	29
2.2. Ограничения, обусловленные ростом льда и свойствами среды	31
2.3. Совершенствование аппаратов с наружным намораживанием льда	31
2.4. Аппараты с внутренним намораживанием льда	32
2.5. Выравнивание потока в межтрубном пространстве	34
2.6. Перегородки, профильные трубы и структурированные поверхности	36
2.7. Совершенствование механизмов удаления льда и непрерывная работа	37
2.8. Совершенствование холодильной системы и энергетическая интеграция	37
2.9. Автоматизация, мехатроника и цифровое проектирование.....	38

2.10. Адаптация конструкции к свойствам разделяемой жидкости	39
2.10.1. Соки и другие растительные экстракты	40
2.10.2. Молоко и молочная сыворотка	40
2.10.3. Вода, рассолы и промышленные стоки	40
2.10.4. Эфирно-масличные и специальные среды	40
2.11. Комплексная концепция перспективного кристаллизатора	41
2.12. Выводы по главе 2	41
Глава 3. Разработка и анализ новых конструкций кристаллизаторов	43
3.1. Постановка задачи и критерии разработки	43
3.2. Базовая двухступенчатая конструкция с предварительным охлаждением	44
3.3. Динамика намораживания и выбор толщины ледяного слоя	46
3.4. Вычислительная модель типовой конструкции	47
3.5. Кристаллизаторы со стержневыми интенсификаторами	48
3.6. Профилирование теплообменной трубы	49
3.7. Патентное семейство профилированных кристаллизаторов	50
3.8. Сопоставление конструктивных решений	52
3.9. Комплексная сравнительная оценка	53
3.10. Конструктивная реализация опытно-промышленного аппарата	54
3.11. Выбор конструкции для различных технологических задач	55
3.12. Выводы по главе 3	56
Заключение	57
Список литературы	60

Введение

Кристаллизационные методы давно применяют для разделения, очистки и сгущения жидких сред. В настоящей работе основное внимание уделено разделительному вымораживанию: при охлаждении из раствора преимущественно выделяется растворитель, тогда как большая часть растворенных веществ остается в жидкой фазе. Если растворителем служит вода, результатом процесса становятся более концентрированный продукт и лед, дающий после плавления воду с меньшим содержанием примесей. Поэтому область применения метода не ограничивается пищевыми концентратами; он представляет интерес для опреснения, водоподготовки, обработки технологических стоков и возврата ценных компонентов из разбавленных растворов.

Необходимость дальнейшего развития кристаллизационных технологий связана сразу с несколькими требованиями: качеством продукции, расходом энергии и экологической безопасностью производства. Для пищевого сырья особенно важно не разрушить витамины, ароматические соединения, природные пигменты, белки и другие чувствительные к нагреву компоненты. В химических и биотехнологических процессах на первый план выходят избирательность разделения, работоспособность оборудования при контакте с коррозионно-активными многокомпонентными средами и сокращение вторичных отходов. В задачах водоподготовки метод должен обеспечивать не только получение очищенной воды, но и уменьшение объема рассолов, которые затем требуется перерабатывать либо утилизировать.

При вымораживании продукт не подвергается тому тепловому воздействию, которое характерно для выпаривания, поскольку удаляемую воду не переводят в пар. От мембранных способов данный процесс отличается отсутствием селективной перегородки и, как правило, меньшей чувствительностью к присутствию некоторых высокомолекулярных веществ. Однако само по себе применение низких температур еще не означает энергетического преимущества. Расход электроэнергии складывается из затрат на холодильную машину и циркуляцию сред, зависит от принятого температурного уровня, теплопритоков, гидравлических потерь, продолжительности цикла и организации отделения льда от концентрата.

Практическая реализация разделительного вымораживания в значительной мере определяется устройством кристаллизатора. Геометрия аппарата задает доступную поверхность и равномерность теплопередачи, влияет на то, образуется ли сплошной ледяной слой или кристаллическая суспензия, а также на количество маточного раствора, удерживаемого твердой фазой. От нее же зависят длительность цикла и удобство выгрузки продуктов разделения. Поэтому при проектировании приходится одновременно обеспечивать достаточную тепловую мощность, приемлемое гидравлическое сопротивление, невысокую материалоемкость, санитарную доступность, надежность узлов и возможность автоматического изменения режима.

При выборе режима возникает характерный компромисс. Более интенсивный отвод теплоты ускоряет появление льда, но слишком быстрое продвижение фронта кристаллизации способно усилить захват маточного раствора и снизить селективность. Кроме того, нарастающий лед сам становится дополнительным термическим сопротивлением, вследствие чего тепловой поток со временем уменьшается. По этой причине геометрию аппарата нельзя выбирать отдельно от режима его работы: требуемая температура хладоносителя определяется

составом раствора, формой охлаждаемой поверхности, текущей толщиной льда, характером движения жидкости и способом последующего разделения фаз.

Объект исследования охватывает технологические схемы и аппараты, предназначенные для кристаллизационного разделения жидкостей вымораживанием. В качестве предмета рассмотрены тепло- и массоперенос при росте льда, конструктивное оформление кристаллизаторов, принципы их сопоставления, приемы интенсификации теплообмена и технические решения, от которых зависят производительность, избирательность процесса и расход энергии.

Цель монографии состоит в том, чтобы обобщить современный опыт кристаллизационного разделения, показать ограничения применяемого оборудования и на этой основе определить обоснованные направления создания кристаллизаторов для пищевых, химических, биотехнологических и водоочистных производств.

Для достижения этой цели последовательно решались несколько взаимосвязанных задач. Были сведены воедино физико-химические положения и аппаратурные схемы разделительного вымораживания, сопоставлены существующие типы кристаллизаторов и области их рационального применения. Отдельно определены показатели, по которым аппараты можно сравнивать с учетом тепловой, энергетической, массовой и эксплуатационной сторон. Рассмотрены способы усиления теплообмена, удаления льда и возврата теплоты, проанализированы многоступенчатые процессы. Кроме того, разработаны и сопоставлены варианты с интенсификаторами и профилированными теплообменными трубами, а также сформулированы требования к масштабированию, автоматизации и опытно-промышленной проверке таких решений.

При анализе использованы положения термодинамики, теории теплопередачи и фазовых превращений, материальные и энергетические балансы, гидродинамические зависимости, вычислительное моделирование и эксергетическая оценка. Кристаллизатор при этом не рассматривается изолированно. Он входит в общую энерготехнологическую систему вместе с холодильной машиной, контурами продукта и хладоносителя, средствами отвода льда, устройствами рекуперации теплоты и системой управления.

Одна из особенностей принятого подхода заключается в отказе от оценки аппарата по единственной теплотехнической характеристике. Увеличенный коэффициент теплоотдачи или большая поверхность еще не делают конструкцию рациональной, если одновременно растут ее масса, сопротивление движению среды, трудоемкость изготовления, склонность к загрязнению либо потери целевых веществ. Поэтому в работе используется группа удельных показателей, характеризующих компактность, материалоемкость, тепловую мощность, производительность и энергию, затрачиваемую на циркуляцию рабочих сред.

Полученные зависимости и критерии могут применяться при выборе схемы криоконцентрирования, определении длительности цикла и допустимой конечной толщины ледяного слоя, а также при разработке нового оборудования. Рассмотренные решения относятся к концентрированию соков, молока и сыворотки, обработке экстрактов и специальных технологических жидкостей, а также к получению пресной воды из солевых растворов.

Первая глава посвящена современному состоянию разделительного вымораживания. В ней изложены физико-химические основы избирательной кристаллизации растворителя, материальный и тепловой балансы, приведена классификация схем и аппаратов. Емкостные, барабанные, скребковые, суспензионные и каскадные кристаллизаторы рассматриваются с учетом способов отделения льда, рабочих параметров, энергетической и эксергетической

эффективности. Здесь же проанализировано применение технологии для соков, молочного сырья, воды и специальных сред, а также вопросы расчетного моделирования и масштабирования.

Во второй главе внимание перенесено с описания известных аппаратов на способы их совершенствования. Показано, что изменения должны охватывать не только теплопередающую поверхность, но и гидравлическую, механическую, энергетическую и санитарную части установки. Рассмотрены наружное и внутреннее намораживание, многотрубные и карусельные компоновки, перегородки и интенсификаторы, профилированные поверхности, узлы удаления льда, возврат теплоты, частотное регулирование и мехатронное управление. Выбор каждого решения связывается со свойствами перерабатываемой жидкости.

В третьей главе эти направления представлены уже в виде конкретных конструкций. Исследована двухступенчатая емкостная установка, в которой исходный продукт предварительно охлаждается за счет холода талой воды; для нее рассмотрены кинетика намораживания и выбор конечной толщины слоя. Результаты вычислительного моделирования использованы для сравнения типового аппарата, вариантов со стержневыми интенсификаторами и конструкций с профилированными трубами. Отдельный раздел посвящен патентному семейству профилей и комплексному выбору аппарата под заданные условия эксплуатации.

Таким образом, изложение построено от общего к частному: сначала оценивается состояние технологии, затем формулируются требования к ее развитию и, наконец, анализируются новые конструкции. Такая последовательность позволяет сопоставить закономерности кристаллизации с инженерными решениями и определить, при каких условиях разделительное вымораживание действительно может быть реализовано в промышленности с приемлемыми техническими и экономическими показателями.

Список сокращений и условных обозначений

- КПД – коэффициент полезного действия;
 A, b – эмпирические коэффициенты;
 E – потребляемая мощность прочих приводов и устройств, Вт;
 F – площадь поверхности теплопередачи, м^2 ;
 K – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
 m – масса кристаллизатора, кг;
 Nu – критерий Нуссельта;
 O – объем кристаллизатора, м^3 ;
 Pr – критерий Прандтля;
 Q – тепловая мощность в кристаллизаторе, Вт;
 q – удельный тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 $R_{\text{заг}}$ – термическое сопротивление загрязнений на теплопередающей стенке, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$;
 $R_{\text{л}}$ – термическое сопротивление слоя льда, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$;
 Re – критерий Рейнольдса;
 V – объёмный расход хладоносителя, $\text{м}^3/\text{с}$;
 W – совокупная мощность, потребляемая при эксплуатации кристаллизатора, Вт;
 $\alpha_{\text{пр}}$ – коэффициент теплоотдачи исходного жидкого продукта, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
 $\alpha_{\text{х}}$ – коэффициент теплоотдачи хладоносителя, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
 β – фактор роста, зависящий от температурного напора, теплоотдачи и теплофизических свойств, $\text{м}/\text{с}^{0,5}$;
 Δm – удельная материалоемкость, $\text{кг}/\text{Вт}$;
 ΔO – коэффициент компактности, $\text{м}^2/\text{м}^3$;
 ΔP – гидравлическое сопротивление при перекачивании хладоносителя, Па;
 Δt – средняя разность температур между хладоносителем и исходным жидким продуктом, $^\circ\text{C}$;
 ΔW – удельная мощность, $\text{Вт}/\text{Вт}$;
 $\delta_{\text{ст}}$ – толщина теплопередающей стенки, м;
 $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала теплопередающей стенки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;
 ξ – толщина слоя льда, м;
 τ – время намораживания, с.

Глава 1. Современное состояние технологии кристаллизации

В первой главе кристаллизационное разделение рассматривается как единый комплекс процессов и оборудования: один из компонентов жидкой системы переводят в твердое состояние, после чего отделяют от оставшегося раствора. Основной материал относится к вымораживанию воды из пищевых продуктов, молочного сырья, соков, природных и технологических вод, а также из химических и биотехнологических жидкостей. Наряду с физико-химическими предпосылками процесса далее анализируются типы аппаратов, их конструкция и режимы, причины загрязнения льда, энергетические показатели, расчетные модели и возможные направления развития технологии.

1.1. Место кристаллизационного разделения в современных технологиях обработки жидких сред

Разделительное вымораживание не следует отождествлять с обычным замораживанием продукта. Во втором случае в твердое состояние переводят практически весь объем, тогда как при криоконцентрировании получают лишь заданное количество кристаллов растворителя и затем отделяют их от сгущенной жидкой фазы. В водных растворах таким растворителем служит вода. Растущий лед в основном вытесняет соли, сахара, органические кислоты, белки и другие растворенные вещества в незамерзшую часть. В предельном расчетном представлении твердая фаза не содержит примесей, а содержание растворенных компонентов в маточном растворе по мере вымораживания увеличивается [1].

Смысл операции не сводится к простому уменьшению объема. После удаления части растворителя возрастает доля полезных компонентов, снижается активность воды, упрощаются транспортирование и последующие стадии переработки. Особенно заметно преимущество метода при работе с термолабильным сырьем: витамины, летучие ароматические соединения, природные пигменты и белки испытывают значительно меньшее температурное воздействие, чем в выпарных аппаратах. По этой причине вымораживание применяют и исследуют при обработке соков, молочной сыворотки, биологических жидкостей и различных экстрактов [1–5].

В ряде задач полезными продуктами являются обе разделенные фазы: концентрат и вода, полученная после плавления льда. Такая схема востребована при опреснении, очистке воды, организации замкнутых водооборотных циклов, переработке жидких отходов и извлечении веществ из слабоконцентрированных растворов. Соленая вода при температуре, близкой к точке замерзания пресной, сохраняет жидкое состояние из-за криоскопического понижения температуры фазового перехода. По мере выделения льда рассол становится крепче, и его температура замерзания продолжает снижаться. Следовательно, температурный режим приходится изменять по ступеням либо непрерывно вслед за составом жидкой фазы.

Технологическая линия криоконцентрирования включает несколько стадий, которые нельзя настраивать независимо друг от друга. Сначала исходную жидкость предварительно охлаждают, затем создают центры кристаллизации и обеспечивают рост льда до размера или толщины, достаточных для отделения. После этого твердую и жидкую фазы сепарируют. В промышленной установке к перечисленным операциям добавляются циркуляция продукта, подготовка хладоносителя, съем или плавление льда, мойка оборудования, автоматическое

регулирование и использование теплоты конденсации. Поэтому результат определяется согласованностью всей схемы, а не только условиями на фронте кристаллизации.

На рисунке 1 представлена функциональная схема разделительного вымораживания для жидких систем.



Рисунок 1 – Функциональная схема разделительного вымораживания жидкой системы

В таблице 1 представлено сравнение основных способов концентрирования жидких сред.

Таблица 1 – Сравнение основных способов концентрирования жидких сред

Критерий	Выпаривание	Мембранное разделение	Вымораживание
Движущая сила	Подвод теплоты и испарение растворителя	Перепад давления или химического потенциала через мембрану	Отвод теплоты и избирательная кристаллизация растворителя
Температурный уровень	Обычно повышенный; возможен вакуум	Низкий или умеренный	Низкий, вблизи криоскопической температуры
Качество	Зависит от температуры и времени пребывания	Как правило, высокое, но возможны загрязнение и поляризация мембраны	Высокое при рациональной скорости кристаллизации
Минус	Высокая теплота парообразования, потери летучих веществ	Стоимость, срок службы и загрязнение мембран	Необходимость чистого льда и эффективного отделения маточного раствора
Результат	Концентрат	Пермеат и ретентат	Концентрат и плавленная вода

Сравнивая способы концентрирования, недостаточно сопоставить только скрытые теплоты кристаллизации и испарения воды. Хотя первая величина существенно меньше второй, холод получают с помощью холодильной машины. Ее фактическое электропотребление зависит от температуры кипения хладагента и эффективности цикла; кроме того, энергию расходуют насосы и устройства отделения льда, а часть холодопроизводительности компенсирует теплопритоки. В связи с этим современный анализ охватывает всю установку, а не ограничивается тепловой характеристикой одного кристаллизатора [6–8].

1.2. Физико-химические основы избирательной кристаллизации растворителя

Состояние системы «лед-раствор» задается температурой, давлением и составом жидкой фазы. Присутствие растворенных веществ уменьшает химический потенциал воды, вследствие чего раствор замерзает при более низкой температуре. В начале вымораживания, пока концентрация невелика, достаточно небольшого переохлаждения. Затем вода удаляется, маточный раствор сгущается, его криоскопическая температура понижается, и для дальнейшего роста льда требуется либо уменьшить температуру поверхности, либо увеличить время контакта. Именно эта закономерность объясняет применение каскадов и необходимость менять задание регулятора в непрерывном аппарате.

Появлению макроскопической твердой фазы предшествует образование центров кристаллизации. Глубокое переохлаждение создает много таких центров и ускоряет льдообразование, однако получаемая структура часто оказывается мелкокристаллической и пористой, с повышенным содержанием маточного раствора. При умеренном переохлаждении и более спокойном росте формируются крупные плотные кристаллы, которые легче отделять и промывать. Таким образом, увеличение производительности может сопровождаться потерей селективности: чрезмерно интенсивное охлаждение дает больше льда за единицу времени, но не всегда обеспечивает его требуемую чистоту.

Перед движущимся фронтом льда возникает слой жидкости с повышенной концентрацией. Вода включается в кристаллическую решетку, тогда как растворенные компоненты оттесняются от поверхности. Если конвекция и диффузия не успевают выравнивать состав, концентрация непосредственно у фронта возрастает быстрее, чем в основном объеме. Локальная равновесная температура при этом снижается, движущая сила кристаллизации уменьшается, а маточный раствор легче оказывается запертым в трещинах, микрополостях и межкристаллических каналах. Обтекание поверхности или перемешивание ослабляет концентрационную поляризацию, но для пищевых эмульсий и хрупких кристаллов чрезмерное механическое воздействие также нежелательно.

При слоевом способе граница фазового превращения постепенно отходит от охлаждаемой стенки в сторону жидкости. Баланс теплоты на этой границе выражается условием Стефана: поток, отведенный через стенку и уже сформированный лед, обеспечивает фазовый переход с учетом теплоты, поступающей со стороны раствора. Чем толще становится слой, тем больше его термическое сопротивление и тем медленнее продвигается фронт. Для плоской поверхности при постоянных свойствах и неизменных граничных условиях толщина льда в первом приближении изменяется пропорционально квадратному корню из времени. Соответствующий коэффициент объединяет температурный напор, теплофизические свойства, теплоотдачу и характеристики стенки. На цилиндрической или сферической поверхности площадь фронта меняется вместе с его положением, поэтому кинетика отличается от плоской. В частности, аналитическое решение для внешнего намораживания на сфере непосредственно связывает продолжительность процесса с геометрическими параметрами [9].

Состав льда зависит не только от фазового равновесия, но и от строения растущего фронта. Плотный гладкий массив обычно удерживает меньше примесей, чем рыхлая разветвленная структура. Маточный раствор попадает в твердую фазу по нескольким причинам: его капли могут быть захвачены механически, жидкость остается в каналах при смыкании кристаллических ветвей, а отдельные вещества адсорбируются на поверхности.

Следовательно, одной установки температуры недостаточно. Для получения чистой талой воды требуется согласованно управлять ростом льда и последующим дренированием, промывкой или частичным плавлением.

При изменении температуры и степени сгущения меняются свойства как льда, так и жидкой среды. Допущение о постоянных теплофизических параметрах приемлемо лишь в сравнительно узком диапазоне; при глубоком охлаждении или существенном концентрировании оно способно заметно исказить расчет. В многокомпонентных пищевых и химических растворах одновременно изменяются вязкость, теплоемкость, теплопроводность и условия массоотдачи. Поэтому расчетная схема должна совместно учитывать фазовое равновесие, теплопроводность, гидродинамику и перенос растворенных компонентов [9–12]. Кроме того, численные исследования показывают влияние микрорельефа и морфологии поверхности на площадь контакта, растекание переохлажденной жидкости и момент начала затвердевания; эти особенности важны при выборе рабочей поверхности [13].

1.3. Материальный и тепловой баланс процесса разделительного вымораживания

Из материального баланса видно не только возможное повышение концентрации, но и влияние загрязнения льда на выход целевых веществ. В идеализированном расчете принимают, что растворенные компоненты полностью остаются в жидкости; тогда их концентрация увеличивается по мере уменьшения массы незамерзшего раствора. В действительном аппарате часть маточного раствора удерживается льдом. В результате вместе с твердой фазой теряется некоторое количество растворенных веществ, и фактический выход концентрата оказывается ниже расчетного.

Для оценки аппарата необходимо одновременно указывать коэффициент концентрирования, степень извлечения целевых компонентов и чистоту кристаллической фазы. Использование только прироста массовой доли сухих веществ может скрывать значительные потери продукта.

Тепловая нагрузка складывается из охлаждения исходной жидкости от начальной температуры до криоскопической, отвода скрытой теплоты при образовании льда, возможного переохлаждения твердой фазы и теплопритоков из окружающей среды.

В начале цикла значительная часть потребляемой энергии расходуется на охлаждение продукта, стенок и хладоносителя, а масса образовавшегося льда еще мала. Поэтому удельное энергопотребление на килограмм льда велико. Затем доля полезной нагрузки возрастает и удельные затраты уменьшаются. На поздней стадии утолщенный ледяной слой повышает термическое сопротивление, скорость кристаллизации падает, а удельные затраты снова растут. Таким образом, для каждого температурного режима существует рациональная конечная толщина слоя.

В экспериментах с емкостным кристаллизатором минимальное удельное энергопотребление наблюдалось при толщине льда 5–6 мм для температуры хладоносителя минус 2°C, 9–12 мм при минус 5°C и 13–16 мм при температуре от минус 7°C до минус 10°C. Для режима, в котором хладоноситель охлаждался примерно до минус 6–7 °C, рациональная продолжительность намораживания составляла около 60–70 мин. Эти значения относятся к конкретной лабораторной установке, однако сам характер зависимости – наличие энергетического оптимума по толщине слоя – имеет общее инженерное значение [1] (рисунок 2).

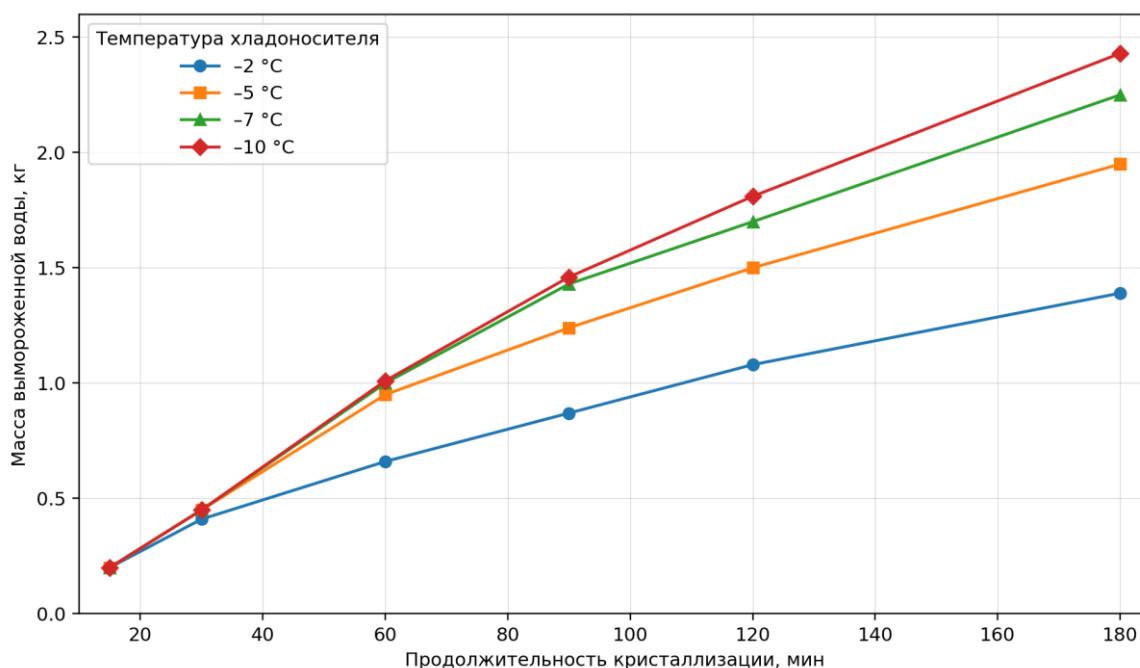


Рисунок 2 – Влияние температуры хладагента и продолжительности процесса на массу вымороженной воды

Построено по экспериментальным данным И.А. Короткого, Д.Е. Федорова и Н.А. Тризно [1].

При сравнении кристаллизации и выпаривания часто сопоставляют скрытую теплоту плавления воды, составляющую около 0,34 МДж/кг, и теплоту парообразования порядка 2,3 МДж/кг. Это указывает на потенциальное преимущество вымораживания, но не является прямой оценкой расхода электроэнергии. Холодильная машина переносит теплоту от низкого температурного уровня к окружающей среде, поэтому затраты зависят от холодильного коэффициента. Чем ниже температура кипения хладагента и выше температура конденсации, тем больше работа компрессора. Кроме того, в баланс входят насосы, мешалки, скребки и нагреватели для снятия льда [3, 6, 8].

Рациональный проект должен учитывать полный жизненный цикл: стоимость теплообменной поверхности и холодильного оборудования, число циклов, производительность, расход хладагента, длительность санитарной обработки и эксплуатационные потери. Увеличение площади поверхности не всегда повышает эффективность, если холодопроизводительность компрессора остается неизменной. В таком случае часть поверхности работает при недостаточном температурном напоре, а капитальные и насосные затраты растут без пропорционального увеличения выхода льда.

1.4. Классификация технологических схем и кристаллизаторов

Современные кристаллизаторы для разделительного вымораживания различаются способом подвода холода, местом образования кристаллов, режимом работы, геометрией поверхности и способом отделения льда. Ни один признак не является исчерпывающим: промышленная установка обычно сочетает несколько классификационных характеристик. Например, барабанный аппарат является кристаллизатором косвенного охлаждения, непрерывного действия, со слоевым ростом льда на внешней цилиндрической поверхности и механическим снятием скребком (таблица 2).

Таблица 2 – Классификация кристаллизаторов разделительного вымораживания

Признак классификации	Основные варианты	Технологическое значение
Способ отвода теплоты	Прямое охлаждение; косвенное охлаждение через стенку; вторичный контур с хладоносителем	Определяет тепловое сопротивление, безопасность контакта и точность регулирования температуры
Место образования твердой фазы	Слой на поверхности; суспензия кристаллов в объеме; полное блочное замораживание	Влияет на чистоту льда, способ сепарирования и масштабирование
Режим работы	Периодический; полунепрерывный; непрерывный; многоступенчатый	Определяет производительность, стабильность состава и сложность автоматизации
Геометрия	Плоская панель; труба; цилиндр или барабан; диски; сфера; оребренная поверхность	Задаёт удельную поверхность, характер роста слоя и доступность механического снятия
Способ удаления льда	Оттаивание; скребок или нож; деформация поверхности; центрифугирование; фильтрование; промывная колонна	Определяет долю захваченного маточного раствора и непрерывность процесса
Организация потока продукта	Неподвижный объем; перемешивание; рециркуляция; пленочное течение; противоток	Управляет тепло- и массоотдачей у фронта кристаллизации

В кристаллизаторах прямого охлаждения фазовый переход вызывается непосредственным контактом продукта с хладагентом либо испарением части влаги в вакууме. Уменьшается число стенок и промежуточных тепловых сопротивлений, но возрастают требования к разделению рабочих сред, улавливанию летучих компонентов и санитарной безопасности. В пищевой промышленности более распространены косвенные схемы, в которых продукт отделен от хладагента металлической стенкой [1]. К этому классу примыкают вакуумно-испарительные системы, в которых вода может одновременно выполнять функции рабочего вещества и объекта фазового превращения [14–15].

Косвенное охлаждение может быть реализовано с непосредственным кипением хладагента в испарителе, встроенном в кристаллизатор, или с вторичным контуром. Вторичный хладоноситель облегчает точное поддержание температуры поверхности и снижает риск локального переохлаждения, но добавляет насос, теплообменник и дополнительный температурный перепад. Выбор между схемами должен опираться на требования к продукту, масштаб установки, допустимую инерционность регулирования и полные затраты.

По способу формирования льда аппараты прежде всего разделяют на слоевые и суспензионные. В первом случае твердая фаза нарастает на охлаждаемой стенке и остается на ней до оттаивания или механического съема. Во втором кристаллы возникают в циркулирующей жидкости, после чего их отделяют фильтрованием, центрифугированием либо в промывной колонне. Слойевая схема проще по устройству, но скорость процесса постепенно ограничивается сопротивлением нарастающего льда. Суспензионную схему легче организовать как непрерывную, однако она требует управления размером кристаллов и более сложного узла сепарации.

1.5. Современные конструктивные решения кристаллизаторов

1.5.1. Емкостные слоевые кристаллизаторы

Емкостный аппарат представляет собой теплоизолированный сосуд, одна или несколько стенок которого охлаждаются. Хладоноситель циркулирует в полости между рабочей емкостью и корпусом либо теплота отводится встроенным испарителем. Во время цикла лед образуется на внутренней стенке, тогда как концентрат собирается в центральной части объема. После завершения намораживания жидкость сливают, а лед отделяют подводом теплой среды или нагревателем и выводят через сливной тракт. Отсутствие сложных подвижных механизмов делает такую схему удобной для лабораторных, малотоннажных и санитарно чувствительных производств [1, 3].

Емкостную схему сравнительно легко герметизировать и промывать; она допускает ступенчатое понижение температуры и позволяет наблюдать либо измерять текущую толщину льда. Эти преимущества сопровождаются характерными ограничениями. Аппарат работает циклически, часть времени расходуется на слив концентрата и оттаивание, температура по высоте емкости может распределяться неравномерно, а тепловой поток падает по мере нарастания твердой фазы. Простое увеличение диаметра проблему масштабирования не решает: удельная поверхность при этом уменьшается, поэтому продолжительность цикла возрастает быстрее, чем полезный объем.

Характер влияния режима хорошо виден по опытам с емкостным аппаратом объемом 4 л. За 180 мин при температуре хладоносителя минус 2°C было получено 1,39 кг льда, тогда как при минус 10°C его масса достигла 2,43 кг. Соответствующая толщина слоя составляла 18,6 и 35,8 мм. Однако больший выход при более глубоком охлаждении нельзя напрямую трактовать как энергетический выигрыш. После достижения рациональной толщины новый лед образуется через уже существующий слой с заметным термическим сопротивлением [1].

1.5.2. Барабанные и чешуйчатые кристаллизаторы непрерывного действия

Рабочая поверхность барабанного кристаллизатора имеет цилиндрическую форму, непрерывно вращается и лишь частично погружена в продукт. На погруженном участке жидкость смачивает барабан тонкой пленкой и начинает замерзать. После выхода из ванны слой продолжает охлаждаться, а затем отделяется неподвижным ножом. В полости барабана движется хладагент либо вторичный хладоноситель. Снятая ледяная чешуя поступает в отдельный бункер, в то время как жидкость остается в ванне или возвращается через внешний циркуляционный контур.

Постоянный съем льда удерживает его толщину на небольшом уровне, и потому сопротивление слоя не успевает стать таким же большим, как при продолжительном периодическом намораживании. За счет этого барабанная установка может работать непрерывно и не требует регулярного прогрева всей рабочей поверхности. Вместе с тем надежность процесса зависит от точности зазора между ножом и барабаном, износостойкости покрытия, равномерного смачивания и ограничения уноса концентрата с чешуйчатым льдом [2, 16–17]. Для сокращения простоев, связанных с заточкой и настройкой инструмента, в льдогенераторах предложено применять долговечные винтовые фрезы [18].

Время пребывания смоченного участка в продукте, а следовательно и конечная толщина льда, определяются частотой вращения. По мере сгущения раствора его вязкость

увеличивается, а криоскопическая температура снижается. Поэтому барабан, работающий с неизменной скоростью, постепенно дает меньше льда, что отражено на рисунке 3.

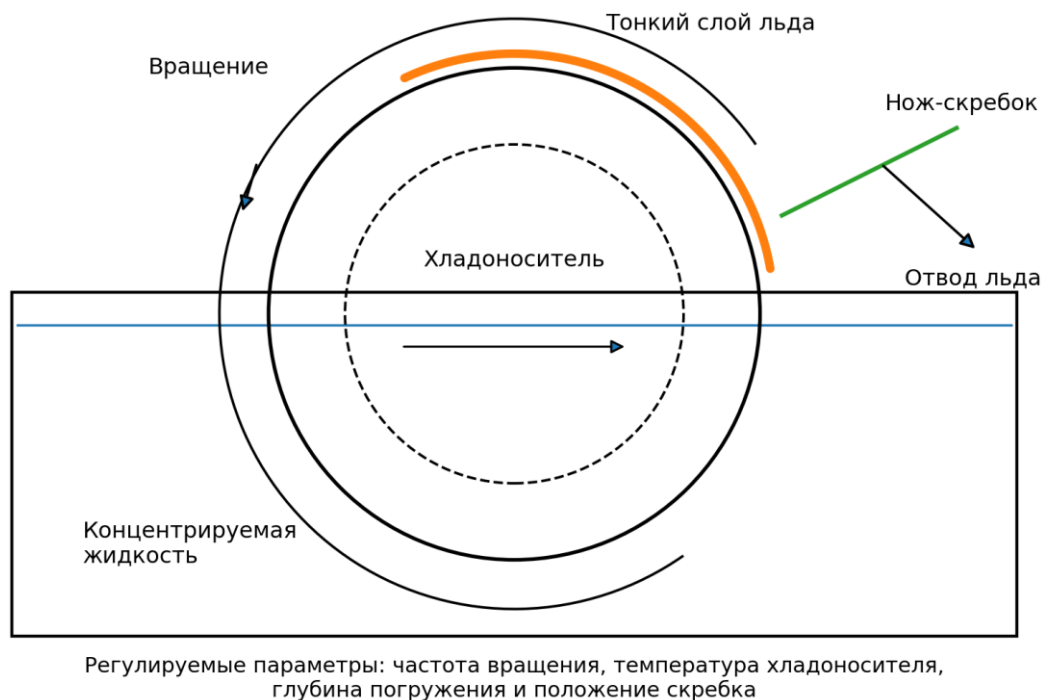


Рисунок 3 – Принципиальная схема барабанного кристаллизатора непрерывного действия

Более устойчивый режим можно получить, если изменять частоту вращения по текущей температуре и составу продукта, одновременно согласуя нагрузку привода с холодопроизводительностью машины. Карусельные и многоповерхностные аппараты используют тот же принцип тонкого слоя, но увеличивают суммарную рабочую площадь без длительного наращивания ледяной корки [19–20].

1.5.3. Кристаллизаторы с формированием суспензии

В суспензионной схеме лед не закрепляется на стенке, а формируется непосредственно в циркулирующем объеме. Охлаждаемую поверхность очищают скребками, чтобы не допустить образования неподвижной корки и переносить возникающие зародыши в жидкость. Затем водоледную смесь направляют в аппарат созревания: часть мелких кристаллов растворяется, а более крупные продолжают расти. От жидкой фазы их отделяют фильтрами, центрифугами или промывными колоннами.

Такой способ позволяет организовать непрерывный поток и при соответствующем режиме получать достаточно крупные кристаллы с небольшой удельной поверхностью. Хорошая промывка дает лед с низким содержанием растворенных веществ. Цена этого преимущества - более сложная аппаратурная схема. Требуется поддерживать заданное распределение частиц по размерам, предотвращать их слипание, сохранять устойчивую циркуляцию и не допускать закупоривания каналов. При обработке вязких или коллоидных пищевых продуктов выполнение этих условий особенно затруднено.

1.5.4. Многоступенчатые и каскадные установки

По мере удаления воды маточный раствор становится более концентрированным и замерзает при все более низкой температуре. Поэтому одноступенчатый аппарат, сохраняющий один и тот же режим, постепенно теряет движущую силу процесса, а лед может удерживать больше жидкой фазы. В каскаде концентрат после отделения первой порции льда передают на следующую ступень, где поверхность работает при более низкой температуре (рисунок 4).

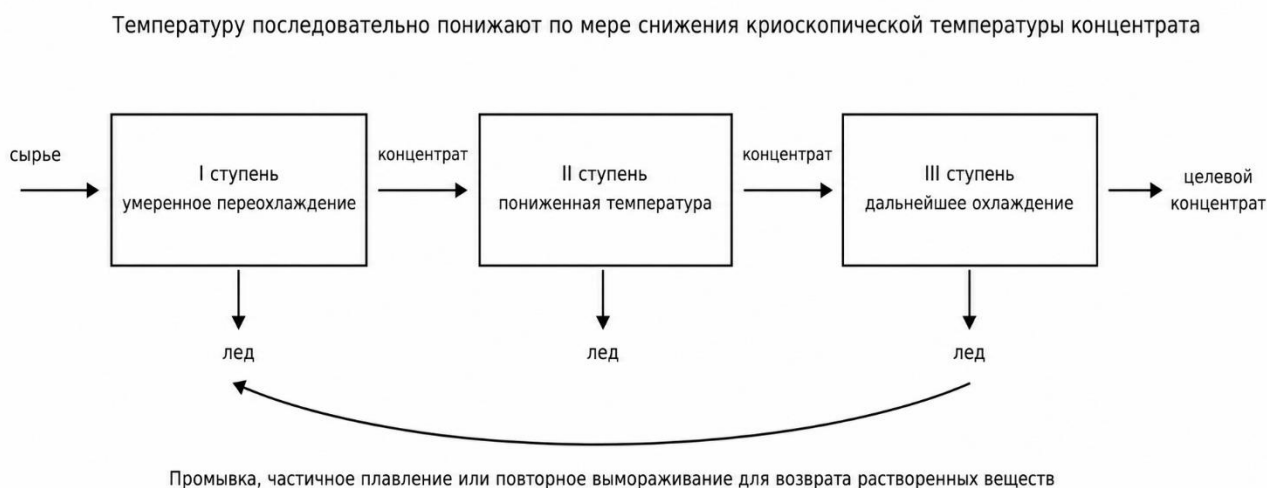


Рисунок 4 – Принцип организации многоступенчатого криоконцентрирования

Поскольку состав на отдельной ступени изменяется в сравнительно узких пределах, ее режим можно подбирать самостоятельно, не распространяя одно температурное задание на весь процесс.

При трех последовательных ступенях обработки молочной сыворотки температура хладоносителя составляла минус 4°C, минус 5,5°C и минус 7°C. Содержание сухих веществ возросло с 7,25% до 14,37%, то есть приблизительно удвоилось. Вместе с тем полученный лед не был полностью свободен от продукта: в нем обнаруживались белок, лактоза и другие сухие вещества. Их общие потери по ступеням составили соответственно 37,7%, 29,5% и 27,4% от исходного содержания. Следовательно, каскад обеспечивает глубокое концентрирование, но для повышения выхода требует промывки, повторной кристаллизации или возврата первой порции талой воды [3].

В таблице 3 для сравнения сведены характеристики основных конструктивных типов кристаллизаторов.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика кристаллизаторов

Тип аппарата	Преимущества	Основные ограничения	Область применения
Емкость	Простота, герметичность, удобство ступенчатых режимов и санитарной обработки	Периодичность, рост термического сопротивления, затраты на оттаивание	Лабораторные и малотоннажные процессы; ценные термолабильные продукты
Барабан	Непрерывность, тонкий слой, высокая удельная поверхность	Износ скребка, требования к равномерному смачиванию, риск захвата жидкости	Соки, молочные среды, получение льда и непрерывное концентрирование

Тип аппарата	Преимущества	Основные ограничения	Область применения
Суспензия	Возможность крупных кристаллов и глубокой промывки	Сложное разделение, управление размером частиц и циркуляцией	Крупнотоннажные процессы при высоких требованиях к чистоте льда
Каскад	Высокая конечная концентрация, гибкость температурных режимов	Рост числа аппаратов, необходимость возврата потерь и синхронизации ступеней	Глубокое концентрирование и опреснение

В соответствии с данными в таблице 3 можно подобрать наиболее подходящий тип кристаллизатора.

1.6. Сепарирование льда и обеспечение селективности процесса

На практике именно отделение льда часто оказывается наиболее трудной частью процесса. После контакта с концентратом поверхность кристаллов покрыта пленкой маточного раствора, часть жидкости удерживается капиллярами, а отдельные межкристаллические полости остаются замкнутыми. Обычный слив удаляет лишь свободную жидкую фазу, поэтому вместе со льдом теряется некоторое количество растворенных компонентов. По этой причине массу вымороженной воды необходимо оценивать совместно с ее химическим составом.

Для очистки слоевого льда после слива концентрата дают время на стекание пленки, промывают поверхность холодной водой либо сначала расплавляют наиболее загрязненную наружную часть, а затем весь массив. Первая порция талой воды обычно содержит больше примесей, поскольку они сосредоточены в поверхностных и межкристаллических каналах; ее целесообразно вернуть в процесс. Последующая фракция получается чище. В суспензионных установках аналогичную задачу решают центрифугированием и противоточной промывкой кристаллов.

Качество разделения характеризуют не одной величиной. Учитывают содержание растворенных веществ в твердой фазе, удержание продукта, степень извлечения растворителя и выход концентрата. Для пищевых систем дополнительно определяют белок, сахара и минеральные компоненты, кислотность, цвет, аромат и сохранность биологически активных веществ. При опреснении контролируют солесодержание и электропроводность талой воды. В химической технологии набор анализируемых показателей выбирают с учетом ценности и опасности каждого компонента.

Опыты с молочной сывороткой показали, что медленный рост способствует образованию более плотного льда. Тем не менее даже в таком массиве встречаются включения коагулировавшего белка. Температурный режим поэтому следует увязывать с движением жидкости, состоянием белково-коллоидной системы и выбранным способом съема твердой фазы. Для сложных дисперсных продуктов полезно ограничивать сдвиговые нагрузки, а при необходимости предварительно фильтровать или стабилизировать сырье.

Потери целевых веществ можно уменьшить дополнительной ступенью вымораживания. Загрязненный лед плавят и рассматривают талую воду как слабый раствор: из нее снова выделяют чистую твердую фазу, а обогащенную жидкую фракцию возвращают к основному потоку. Селективность всей схемы при этом возрастает. Одновременно увеличиваются число аппаратов, капитальные вложения и расход энергии, поэтому

целесообразность каскада зависит от стоимости продукта и требований к качеству получаемой воды.

1.7. Параметры режима и управление процессом

Наиболее доступным для регулирования параметром служит разность температур между раствором и охлаждаемой стенкой. Ее увеличение ускоряет теплоотвод, однако одновременно усиливает переохлаждение и создает условия для захвата маточного раствора. Поэтому в непрерывном аппарате стремятся не к минимальной температуре как таковой, а к режиму, при котором холодопроизводительность машины соответствует площади поверхности и скорости движения продукта.

Рост удельной площади приносит эффект лишь до тех пор, пока холодильная машина способна отвести дополнительную теплоту. В экспериментах с вишневым соком увеличение поверхности до $72\text{--}75\text{ м}^2/\text{м}^3$ повышало удельный выход льда. При дальнейшем росте площади результат уже не был пропорциональным, поскольку ограничивающим фактором становилась холодопроизводительность. Более того, удельные энергетические затраты продолжали увеличиваться. Этот пример показывает, что оптимизировать следует установку в целом, а не единственный геометрический параметр [2].

Интенсивность тепло- и массообмена заметно зависит от скорости жидкости. Более сильная циркуляция истончает концентрационный пограничный слой и ускоряет кристаллизацию, но требует большей мощности насоса, может уносить мелкий лед и повреждать структуру продукта. В барабанной конструкции сходным управляющим воздействием является частота вращения. При слишком медленном движении нарастает толстый слой, а при чрезмерно быстром лед не успевает окрепнуть и отделяется вместе с жидкой пленкой.

Исходный состав влияет на процесс неоднозначно. При повышении доли сухих веществ остается меньше свободной воды и снижается криоскопическая температура, одновременно меняются теплоемкость, вязкость и характер течения. В опытах с вишневым соком более концентрированное сырье давало меньше льда в пересчете на объем аппарата. При этом максимальные затраты энергии на 1 кг льда были получены для сока с меньшей начальной концентрацией: большая доля воды соответствовала более высокой общей тепловой нагрузке [2].

Периодическую стадию следует прекращать до того, как тепловой поток заметно уменьшится из-за толщины льда. Фиксированное время не обеспечивает воспроизводимого результата, поскольку партии различаются по начальной температуре и составу, а теплопритоки также меняются. Надежнее использовать совокупность измеряемых и расчетных величин: температуру стенки и продукта, перепад температур хладоносителя, мощность компрессора и текущую оценку толщины слоя (таблица 4).

Таблица 4 – Влияние основных параметров на работу кристаллизатора

Фактор	Обычный эффект роста	Риск избытка	Контроль
Разность температур	Ускорение образования льда	Мелкие кристаллы, включения маточного раствора, рост работы компрессора	Температура продукта и поверхности, давление кипения
Толщина слоя льда	Увеличение массы твердой фазы	Рост термического сопротивления и удельной энергии	Косвенная оценка по тепловому потоку или прямой датчик
Скорость циркуляции	Рост тепло- и массоотдачи	Увеличение насосной мощности, повреждение дисперсной структуры	Частотный привод насоса, расходомер
Частота вращения барабана	Уменьшение времени контакта и толщины слоя	Недостаточное намораживание, унос жидкой пленки	Привод с обратной связью по температуре и толщине
Состав сырья	Понижение криоскопической температуры и рост вязкости	Снижение производительности и ухудшение перемешивания	Рефрактометрия, плотность, электропроводность
Удельная поверхность	Рост потенциальной производительности	Несоответствие с холодопроизводительностью и рост капитальных затрат	Расчет теплового баланса и оптимизация жизненного цикла

Для такой установки предпочтительно каскадное регулирование. Быстрый внутренний контур поддерживает температуру хладоносителя либо давление кипения, а внешний изменяет его задание с учетом температуры и концентрации продукта. В барабанном аппарате к этим воздействиям добавляется частота вращения. Частотный привод компрессора уменьшает количество пусков, снижает динамические нагрузки и дает возможность подстраивать холодопроизводительность под текущую тепловую нагрузку [19, 21].

1.8. Энергетическая и эксергетическая эффективность

Обычный энергетический баланс показывает, сколько энергии потреблено, но не отражает различий в ее качестве и необратимости отдельных стадий. Для низкотемпературной техники это существенно: одна и та же теплота имеет разную работоспособность при разных температурных уровнях. Эксергетический подход оценивает способность энергетических потоков превращаться в полезную работу и тем самым помогает определить элементы, в которых термодинамический потенциал разрушается наиболее заметно [6].

Для рассмотренной концентрирующей установки расчетный эксергетический коэффициент полезного действия (КПД) оказался близок к 24%. На терморегулирующий вентиль приходилось 21,33% всей подведенной эксергии - это была наибольшая единичная потеря. Значимые потери отмечены также в испарителе, конденсаторе и компрессоре. Следовательно, улучшение только рабочей емкости не обеспечит существенного повышения общей эффективности без изменения холодильного цикла и его теплообменных узлов [6].

Теплота, обычно отводимая конденсатором в окружающую среду, может быть возвращена в технологический цикл. После слива концентрата лед необходимо ослабить у стенки либо полностью расплавить; для этого же источника теплоты достаточно и для

подогрева промывной воды или подготовки следующей партии. Совмещение холодной и теплой стадий уменьшает потребность во внешнем нагреве и сокращает вспомогательное время цикла [6, 22].

Еще один резерв связан с отказом от избыточно больших температурных перепадов. Глубокое кипение хладагента действительно ускоряет начальное намораживание, однако ухудшает холодильный коэффициент и способно снизить чистоту льда. Вторичный контур дает более точное приближение температуры стенки к текущей криоскопической температуре раствора, но вводит дополнительное сопротивление и затраты на насос. Поэтому рациональный режим выбирают по совокупности производительности, удельной энергии, качества разделения и стоимости оборудования.

Нагрузка холодильной установки в течение цикла существенно меняется. Сначала охлаждаются продукт и конструкция, затем основная часть холода расходуется на фазовый переход, а после образования толстого слоя тепловой поток падает. Если компрессор и насосы все время работают с максимальной производительностью, возникают частые отключения либо переохлаждение. Частотное регулирование позволяет пройти эти стадии плавно, уменьшает число переходных процессов, повышает ресурс оборудования и облегчает получение льда с заданной структурой [21].

При оценке установки важно не смешивать эффективность холодильного цикла с результативностью самого разделения. Небольшое электропотребление не является преимуществом, если значительная часть ценных компонентов уходит вместе со льдом. Обратная ситуация возникает при глубокой промывке: выход продукта повышается, но возрастает расход воды, насосная нагрузка и требуемая площадь оборудования. Поэтому итоговый показатель целесообразно связывать с энергией и приведенными затратами, приходящимися на единицу концентрата заданного качества при установленной чистоте талой воды.

1.9. Промышленное применение технологии низкотемпературного разделения

1.9.1. Концентрирование соков

Фруктовые соки наглядно показывают преимущества низкотемпературного концентрирования. Их аромат во многом формируют летучие соединения, а витамины и окрашивающие вещества плохо переносят длительный нагрев. Даже умеренная температура выпаривания при большом времени пребывания способна изменить вкус, цвет и пищевую ценность. При разделительном вымораживании вода удаляется ниже 0°C, что создает более благоприятные условия для сохранения исходных органолептических свойств [2, 16, 23].

Опыты с вишневым соком показали, что количество выделенного льда зависит сразу от четырех факторов: температуры кипения хладагента, удельной поверхности аппарата, расхода сока и исходной доли сухих веществ. Более низкая температура кипения увеличивала выход льда, но одновременно повышала удельные затраты энергии. Поэтому рациональный режим для соков обычно связан с умеренным переохлаждением, достаточно интенсивным движением продукта и ограниченным временем его нахождения в аппарате, а не с предельно низкой температурой [2, 24].

Тонкий слой, характерный для барабанных и пленочных кристаллизаторов, удобен при обработке соков и допускает непрерывное удаление льда. Однако мякоть и пектиновые вещества могут накапливаться на скребке и охлаждаемой поверхности. Узел съема должен

сохранять постоянный зазор и быть доступным для разборки и мойки. Если сок содержит много взвешенных частиц, перед криоконцентрированием целесообразно осветление либо такой режим течения, при котором частицы не захватываются растущим льдом.

1.9.2. Молоко и молочная сыворотка

Молоко и сыворотка относятся к многокомпонентным полидисперсным средам. Наряду с лактозой и солями в них присутствуют белковые коллоиды, жировые шарики и биологически активные вещества. Охлаждение подавляет развитие микроорганизмов, но способно изменить состояние белковой и жировой фаз. По этой причине низкотемпературную обработку следует проводить мягко и без избыточных сдвиговых нагрузок [3, 25–26]. Исследования выделения белков и лактозы, а также концентрирования творожной сыворотки показывают, что температуру поверхности необходимо выбирать не только по массе полученного льда, но и по потерям сухих веществ [27–28].

Криоконцентрирование позволяет сократить объем молочной сыворотки и повысить содержание в ней лактозы и сывороточных белков. Каскад из нескольких ступеней дает заметное сгущение, однако измеренные потери сухих веществ указывают на необходимость более эффективной промывки и организации возвратных потоков. В отличие от простых солевых растворов белковые компоненты способны адсорбироваться на фронте и оставаться во льду в виде видимых включений, что усложняет получение чистой водной фракции [3].

На рисунке 5 показан ледяной массив, полученный при низкотемпературном концентрировании молочной сыворотки в емкостном аппарате.



Рисунок 5 – Лед после концентрации молочной сыворотки

Для молочного сырья недостаточно оценить только достигнутую массовую долю сухих веществ. Не менее важны функциональные свойства белков, устойчивость жировой эмульсии и пригодность концентрата к дальнейшим технологическим операциям. Сильная циркуляция и жесткое скребковое воздействие могут повреждать оболочки жировых шариков. Поэтому

рабочие поверхности должны иметь малую шероховатость, а аппарат - санитарное исполнение и возможность полноценной безразборной мойки.

1.9.3. Очистка и опреснение воды

При опреснении в кристаллическую фазу переводят воду, тогда как растворенные соли остаются в рассоле. С образованием льда соленость жидкости повышается и ее криоскопическая температура понижается, поэтому последующие порции воды приходится вымораживать при более низком температурном уровне. Кристаллическая решетка льда слабо принимает ионы, что обеспечивает высокую потенциальную селективность. Реальное качество воды, однако, ограничивается количеством рассола, механически удержанного твердой фазой.

Чистоту талой воды повышают медленным формированием плотного льда, промывкой, частичным плавлением и повторной кристаллизацией. Исследования подготовки воды для молочного производства подтверждают применимость разделительного вымораживания как одной из стадий водоподготовки [29]. Тот же принцип может использоваться для минерализованных промышленных стоков. При этом необходимо учитывать конкретный солевой состав, положение эвтектических точек и возможность самостоятельной кристаллизации солей.

Наиболее благоприятные энергетические условия для низкотемпературного опреснения возникают при наличии природного зимнего холода, доступных холодных технологических потоков или совместной работе с уже действующей холодильной системой. Если установка создается как самостоятельная, ее следует сравнивать с мембранными и испарительными способами не только по электроэнергии. Существенны также капитальные затраты, надежность отделения льда и дальнейшее обращение с концентрированным рассолом.

1.9.4. Химические, биотехнологические и специальные среды

В химической технологии вымораживанием можно разделять водные растворы реагентов, экстракты, промежуточные продукты и сточные воды при условии, что растворитель кристаллизуется избирательно, а компоненты смеси не образуют опасной твердой фазы. Для биотехнологических сред ценность низкой температуры состоит в замедлении химических и ферментативных превращений. В литературе, в частности, описано криоконцентрирование сыворотки крови и других биологических жидкостей [5].

В таблице 5 приведены основные направления применения криоконцентрирования.

Таблица 5 – Основные области применения кристаллизаторов

Объект	Цель обработки	Критический показатель	Аппаратурное решение
Соки	Сохранение аромата и витаминов при удалении воды	Цвет, аромат, сухие вещества, потери сахаров	Барабанный, пленочный аппарат или мягкий многоступенчатый процесс
Сыворотка	Утилизация побочного продукта, выделение лактозы и белков	Белок и лактоза во льду, функциональность белка	Емкостный или каскадный аппарат с возвратом концентрата

Объект	Цель обработки	Критический показатель	Аппаратурное решение
Соленая вода	Получение опресненной воды и концентрированного рассола	Солесодержание льда и степень опреснения	Слоевой или суспензионный кристаллизатор с промывкой
Биосреды	Мягкое концентрирование термолабильных компонентов	Биологическая активность, стерильность	Герметичный малотоннажный аппарат
Растворы и стоки	Возврат растворителя, уменьшение объема отхода	Чистота растворителя, коррозия, эвтектика	Материально стойкий каскад с отдельным сбором фракций

Частичное удаление воды вымораживанием может предшествовать сублимационной сушке. В этом случае в вакуумную стадию поступает меньшая масса влаги, что потенциально сокращает продолжительность и стоимость сублимации. По мере сгущения, однако, растет вязкость, а локальное переохлаждение способно вызвать нежелательные изменения компонентов. Низкотемпературные способы рассматриваются также для переработки побочных продуктов и сточных потоков пищевых предприятий, в том числе при извлечении пектина и жировых фракций [30].

Для химических растворов выбор материала требует отдельной проверки. Само охлаждение обычно замедляет коррозионные процессы, но одновременное концентрирование солей и органических веществ у стенки может усиливать локальное разрушение, образование отложений и изменение смачиваемости. Поэтому учитывают химическую стойкость, теплопроводность, требования санитарии и характер сцепления льда с рабочей поверхностью.

1.10. Моделирование, расчет и масштабирование кристаллизаторов

Исходной величиной при расчете служит требуемая масса воды, которую необходимо перевести в лед; ее находят из материального баланса. Затем определяют тепловую нагрузку, требуемую поверхность, расход хладоносителя и параметры холодильного цикла. Для периодического процесса дополнительно задают длительность охлаждения, намораживания, слива и оттаивания. При непрерывной работе рассчитывают расход продукта и время пребывания, скорость рабочей поверхности и пропускную способность сепаратора.

Слоевое намораживание относится к задачам с движущейся межфазной границей: неизвестны как температурные поля в жидкости и льду, так и положение самого фронта. Аналитические решения хорошо показывают влияние основных параметров и полезны на начальной стадии проектирования, но обычно основаны на простой геометрии, постоянных свойствах и квазистационарном распределении температуры. Поэтому выражения для плоской стенки, внутренней или наружной цилиндрической поверхности и сферы различаются [9, 11–12]. Для цилиндрической стенки емкостного криоконцентратора расчетная кинетика роста льда удовлетворительно согласовалась с экспериментом [31].

Численный расчет позволяет работать со сложной формой каналов, переменными свойствами, конвекцией и неоднородным температурным полем. Но модель, учитывающая только теплопередачу, не отвечает на вопрос о чистоте льда. Для этого требуется описать концентрационный слой, зависимость криоскопической температуры от состава, зарождение и рост кристаллов, захват маточного раствора и движение жидкости. В пищевых продуктах к перечисленным факторам добавляются изменение вязкости и перестройка дисперсной структуры.

Регрессионные зависимости, полученные по эксперименту, сохраняют практическую ценность. Так, для каждой ступени концентрирования сыворотки рост толщины льда был аппроксимирован квадратичной функцией времени при коэффициенте детерминации выше 0,99 [3]. Однако такая формула надежна только внутри исследованного диапазона. Перенос ее на другой состав, диаметр аппарата или холодильную машину без проверки может дать ошибку; при масштабировании необходимо использовать безразмерные критерии и заново контролировать тепловой баланс.

Увеличение размеров одной емкости уменьшает отношение поверхности к объему. Для сохранения производительности в аппарат вводят трубные пучки, внутренние панели и вращающиеся элементы либо собирают установку из нескольких параллельных модулей. Последний вариант нередко удобнее крупного сосуда: проще мойка, резервирование и ступенчатое изменение мощности. Недостатком становится большее число трубопроводов, арматуры и контуров регулирования.

Выбор конструкции целесообразно формулировать как задачу с несколькими критериями. Одновременно требуется уменьшить расход энергии, потери продукта, стоимость оборудования и длительность цикла, но повысить производительность, степень концентрирования и чистоту льда. Допустимая температура сырья, мощность компрессора, гидравлическое сопротивление, прочность механизма съема и требования санитарной обработки выступают ограничениями, которые нельзя исключать из расчета.

Цифровое проектирование объединяет трехмерный расчет течения, оценку напряжений, подбор приводов и проверку алгоритмов управления. Для барабанного аппарата такая модель может связать температуру продукта и частоту вращения с формируемой толщиной льда. Тем не менее расчет обязательно сопоставляют с натурным опытом: адгезия льда, фактическая шероховатость поверхности и реология концентрата задаются численно лишь приближенно.

Удельное энергопотребление обычно рассчитывают как отношение суммарной электроэнергии компрессора, насосов, приводов и вспомогательных узлов за цикл к массе отделенного льда. Более корректно относить затраты к действительной массе удаленного растворителя, учитывая примеси и потери концентрата. Эксергетический КПД, в свою очередь, сопоставляет полезное изменение состояния продукта с эксергией, подведенной ко всем энергопотребляющим узлам. Такой показатель удобен для сравнения схем с разными температурными уровнями и выявления потерь в холодильном цикле [6].

1.11. Ограничения существующих технологий и направления развития

К настоящему времени физические основы криоконцентрирования изучены значительно лучше, чем вопросы унифицированного аппаратного исполнения. Лабораторные работы подтверждают возможность сгущать соки, молочные и биологические жидкости, очищать воду и получать лед при приемлемых затратах. Промышленное внедрение сдерживают главным образом сложность надежной сепарации и сильная зависимость результата от состава конкретного продукта.

Наиболее очевидная нерешенная задача - унос растворенных веществ твердой фазой. Его уменьшают, управляя строением льда, применяя промывку и частичное плавление, а загрязненные фракции возвращая в основной поток.

Другая трудность связана с падением теплового потока по мере роста слоя. Здесь предпочтительны решения, не допускающие большого утолщения льда: непрерывный съем, скребковые узлы, вибрирующие или деформируемые поверхности и модульные панели.

Третья проблема – переменная криоскопическая температура, требующая адаптивного управления.

В таблице 6 представлены основные направления дальнейшего развития технологии криоконцентратора.

Таблица 6 – Основные задачи развития кристаллизаторов

Проблема	Причина	Решение	Эффект
Высокое содержание продукта во льду	Быстрый рост, пористость, захват пленки	Медленное созревание, промывка, частичное плавление, повторная кристаллизация	Рост объема и чистоты воды на выходе
Снижение производительности со временем	Рост термического сопротивления ледяного слоя	Тонкослойные поверхности, непрерывный скребок, оптимальная конечная толщина	Стабильный тепловой поток
Переменная нагрузка холодильной системы	Охлаждение, фазовый переход и поздняя стадия требуют разной мощности	Частотное регулирование и модельно-предиктивное управление	Снижение энергии и переохлаждения
Сложное масштабирование	Изменение отношения поверхности к объему и гидродинамике	Модульность, численное моделирование и пилотная верификация	Предсказуемая производительность
Затраты на снятие льда	Необходимость нагрева или механического разрушения	Рекуперация теплоты конденсации, деформируемые поверхности	Сокращение цикла и внешнего теплопотребления
Санитарные и коррозионные риски	Отложения концентрата, труднодоступные зоны, агрессивная жидкая фаза	Гигиенический дизайн, мойка, стойкие материалы и покрытия	Надежность и качество продукта

Автоматизация постепенно переходит от простого поддержания температуры к оценке текущего состояния продукта и льда. Наряду с температурой и давлением измеряют плотность, показатель преломления, электропроводность либо спектральные характеристики. По этим сигналам можно рассчитывать состав раствора, положение фронта и ожидаемое качество твердой фазы. Модельно-предиктивный алгоритм заранее изменяет частоту компрессора, насоса и барабана, не допуская чрезмерного переохлаждения и длительной работы через толстый ледяной слой.

Снижение энергозатрат связывают с возвратом теплоты конденсации, использованием природного и низкопотенциального холода, уменьшением гидравлических потерь, улучшением изоляции и регулируемые приводами. Криоконцентратор может быть включен в общий комплекс с холодильным складом, тепловым насосом, ледоаккумулятором или производством, где одновременно нужны холод и низкопотенциальное тепло. В таком сочетании полезно используются оба энергетических потока парокомпрессионного цикла.

Дополнительный эффект дает возврат холода льда и согласование геометрии с режимом так, чтобы в определенном диапазоне рост блока не увеличивал, а снижал суммарное термическое сопротивление [32].

Экологические характеристики зависят от выбранного хладагента, герметичности контура, возврата талой воды и количества образующихся отходов. Переход на природные или низкопотенциальные рабочие вещества требует учитывать давление, безопасность персонала и допустимость применения рядом с пищевым продуктом. Вторичный контур изолирует хладагент в машинном отделении, но добавляет насосную мощность и дополнительный температурный перепад.

Вероятное направление конструктивного развития - санитарные модульные аппараты с большой удельной поверхностью, небольшим удерживаемым объемом и коротким переключением между стадиями. Для барабанов и скребков требуются износостойкие покрытия с заданной адгезией, для емкостных устройств - сьем льда без полного оттаивания, для суспензионных схем - компактные классификаторы и промывные узлы. Поиск таких решений отражен в патентах на непрерывные, карусельные и комбинированные криоконцентраторы [17, 20, 33]. Практическими примерами служат мехатронный модуль карусельного аппарата [34] и барабанная установка для разделения эфирно-масличных дистиллятов [35].

1.12. Выводы по главе 1

Разделительное вымораживание представляет собой самостоятельный способ очистки и концентрирования: растворитель избирательно превращают в твердую фазу, а большая часть растворенных компонентов остается в маточном растворе. В водных системах за один процесс получают сгущенную жидкость и водную фракцию после плавления льда.

Результат определяется не только скоростью образования льда, но и качеством его отделения. Большой температурный напор повышает производительность, однако увеличивает вероятность загрязнения твердой фазы. При длительном слоевом намораживании нарастающее термическое сопротивление замедляет процесс и после определенной толщины повышает удельные энергетические затраты.

Наиболее подробно исследованы емкостные, барабанные, скребковые, суспензионные и каскадные схемы. Емкостный аппарат прост и удобен для периодических операций; барабан поддерживает тонкий слой за счет непрерывного съема; суспензионная технология способна обеспечить чистый лед, но требует сложной сепарации; каскад учитывает последовательное снижение криоскопической температуры.

Опыты с соками и молочной сывороткой подтверждают возможность существенного сгущения без жесткого нагрева термолабильных компонентов. В то же время вместе со льдом теряется заметная доля сухих веществ. Поэтому промывка, частичное плавление и возврат загрязненных потоков остаются важнейшими направлениями дальнейшей разработки.

Энергетический результат зависит от работы не только кристаллизатора, но и компрессора, насосов и устройств съема льда. Эксергетические расчеты выявляют значимые потери в дросселирующем органе, испарителе, конденсаторе и компрессоре. Наиболее очевидные резервы - использование теплоты конденсации и регулирование приводов по текущей нагрузке.

Промышленное масштабирование требует сопряженного описания тепло- и массопереноса, учета структуры льда, санитарного исполнения и автоматического управления

по температуре и составу продукта. Вместо простого увеличения одного аппарата предпочтительно наращивать число одинаковых модулей.

Глава 2. Направления совершенствования кристаллизаторов

Развитие оборудования для разделительного вымораживания нельзя сводить к одному лишь усилению теплообмена. Конструкция должна одновременно обеспечивать более избирательное разделение, меньший расход энергии и материалов, а также удобную санитарную обработку. По этой причине кристаллизатор оценивается не как самостоятельная емкость, а как часть общей системы, в которую входят холодильная машина, контуры продукта и хладоносителя, узлы снятия и сепарирования льда и средства автоматического управления.

Материал главы опирается на выполненный ранее анализ конструкций и дополнен данными по теплопередаче, гидродинамике, расчетному моделированию, энергетике и мехатронным системам. Далее сопоставляются аппараты с наружным и внутренним льдообразованием на трубах, двухтрубные и многотрубные компоновки, приемы выравнивания и интенсификации течения в межтрубном пространстве, профилированные поверхности, механизмы съема льда, способы возврата теплоты и адаптивное регулирование.

2.1. Критерии и показатели совершенствования кристаллизаторов

По общей компоновке трубчатый кристаллизатор близок к рекуперативному теплообменнику. Однако движущийся фронт фазового перехода делает условия его работы нестационарными. По ходу цикла меняются толщина и теплопроводность льда, состав и криоскопическая температура маточного раствора, вязкость продукта и сопротивление каналов. Поэтому даже максимальное значение отдельного коэффициента теплоотдачи не гарантирует, что аппарат в целом будет наиболее эффективным.

Для кожухотрубчатых и двухтрубных теплообменников предложено множество способов интенсификации: изменение поперечного сечения труб, углубления и ребра, внутренние вставки, профилированные каналы, перераспределение потока и статистическая оптимизация режима [36–47]. При переносе этих приемов в кристаллизатор необходимо дополнительно проверить, как они влияют на загрязнение льда, его сцепление со стенкой и возможность удаления отложений.

Тепловая мощность в кристаллизаторе определяется основным уравнением теплопередачи:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где Q – тепловая мощность в кристаллизаторе, Вт; K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C); F – площадь поверхности теплопередачи, м²; Δt – средняя разность температур между хладоносителем и исходным жидким продуктом, °C.

Если разложить общее сопротивление теплопередаче на составляющие со стороны продукта и хладоносителя, стенки, загрязнений и нарастающего льда, коэффициент теплопередачи принимает следующий вид:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{пр}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{х}}} + R_{\text{заг}} + R_{\text{л}}}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{пр}}$ – коэффициент теплоотдачи исходного жидкого продукта, Вт/(м²·°C); $\alpha_{\text{х}}$ – коэффициент теплоотдачи хладоносителя, Вт/(м²·°C); $\delta_{\text{ст}}$ – толщина теплопередающей стенки, м; $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала теплопередающей стенки, Вт/(м·°C); $R_{\text{заг}}$ –

термическое сопротивление загрязнений на теплопередающей стенке, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; $R_{\text{л}}$ – термическое сопротивление слоя льда, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$.

Режим течения в каналах непосредственно влияет на теплоотдачу; в инженерных расчетах его описывают критериями Нуссельта, Прандтля и Рейнольдса. С увеличением скорости хладоносителя растут число Рейнольдса и коэффициент теплоотдачи, но одновременно повышается мощность на перекачивание, а для пищевой среды возможно нежелательное механическое воздействие. Совокупную мощность, потребляемую установкой, определяют выражением:

$$W = V \cdot \Delta P + E, \quad (3)$$

где W – совокупная мощность, потребляемая при эксплуатации кристаллизатора, Вт; V – объёмный расход хладоносителя, $\text{м}^3/\text{с}$; ΔP – гидравлическое сопротивление при перекачивании хладоносителя, Па; E – потребляемая мощность прочих приводов и устройств, Вт.

Сравнение вариантов удобнее проводить не по одной абсолютной величине, а по группе удельных показателей. Первым из них является удельный тепловой поток:

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (4)$$

где q – удельный тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Отношение совокупной мощности, потребляемой при эксплуатации кристаллизатора, к тепловой мощности:

$$\Delta W = \frac{W}{Q}, \quad (5)$$

где ΔW – удельная мощность, $\text{Вт}/\text{Вт}$.

Масса на 1 Вт тепловой мощности в кристаллизаторе:

$$\Delta m = \frac{m}{Q}, \quad (6)$$

где Δm – удельная материалоемкость, $\text{кг}/\text{Вт}$; m – масса кристаллизатора, кг.

Коэффициент компактности кристаллизатора:

$$\Delta O = \frac{F}{O}, \quad (7)$$

где ΔO – коэффициент компактности, $\text{м}^2/\text{м}^3$; O – объем кристаллизатора, м^3 .

В таблицу 7 сведены основные показатели для совершенствования кристаллизаторов.

Таблица 7 – Основные критерии совершенствования кристаллизаторов

Критерий	Целевое изменение	Ограничивающие факторы	Предпочтительные решения
Удельный тепловой поток	Повышение	Рост слоя льда, загрязнение, слабая циркуляция	Тонкий слой, развитая поверхность, выравнивание скорости потока хладоносителя
Удельная мощность	Снижение	Гидравлическое сопротивление, частые пуски компрессора, цикл оттаивания	Частотное регулирование, рекуперация, короткие контуры
Удельная материалоемкость	Снижение	Толстостенные кожухи, избыточные опоры и приводы	Модульность, профильные трубы, совмещение функций элементов
Коэффициент компактности	Повышение	Ограниченный объем продукта и санитарные зоны	Пучки труб, оребрение, многоповерхностные модули
Селективность разделения	Повышение	Захват маточного раствора, высокая скорость фронта	Умеренное переохлаждение, промывка, частичное плавление
Эксплуатационная надежность	Повышение	Адгезия льда, износ скребков, забивание каналов	Самоочищающиеся узлы, контролируемая шероховатость, доступность мойки

Рациональная конструкция должна давать большой удельный тепловой поток и более высокую компактность, не увеличивая при этом удельную потребляемую мощность и материалоемкость.

2.2. Ограничения, обусловленные ростом льда и свойствами среды

В обычном теплообменнике сопротивления в первом приближении остаются постоянными, тогда как в кристаллизаторе по мере работы появляется и растет слой льда. В начале цикла тепловой поток в основном задают коэффициенты теплоотдачи со стороны обеих жидкостей. После образования сплошной твердой фазы определяющей становится теплопроводность льда. Если поверхность не очищать, увеличение температурного напора компенсирует это сопротивление лишь частично и одновременно создает более благоприятные условия для захвата концентрата.

При пленочном течении по льду существенны не только средняя скорость, но и толщина пленки, ее волновая структура, скорость стекания и градиент концентрации [48]. В емкостной схеме кинетика слоя связана с геометрией аппарата и температурным режимом [31, 49]. Дополнительно на локальное переохлаждение, площадь контакта и адгезию твердой фазы влияют шероховатость, микрорельеф и смачиваемость поверхности [13, 50–51].

Любой интенсификатор следует оценивать вместе с режимом и свойствами продукта. Ребра, вставки и перегородки способны усилить теплоотдачу, но одновременно формируют застойные области, усложняют безразборную мойку и могут удерживать концентрат. Коллоидные и вязкие жидкости допускают меньшие гидравлические и сдвиговые нагрузки, чем вода или простой солевой раствор. Следовательно, поверхность, удачная для рассола, не обязательно подойдет для сока, молока либо промышленного стока.

Практическая задача состоит не в получении максимально толстого слоя, а в достижении заранее выбранной конечной толщины. В периодическом аппарате намораживание прекращают до заметного роста удельных энергозатрат. В непрерывном - лед снимают сразу после того, как слой приобрел достаточную прочность и способен отделиться от стенки. Для обоих вариантов требуется измерять температуру, оценивать концентрацию продукта и косвенно определять текущее положение фронта.

2.3. Совершенствование аппаратов с наружным намораживанием льда

На рисунке 6 показан пленочный кристаллизатор, в котором лед образуется снаружи вертикальных труб; прототип такой схемы описан в патенте [52]. Продукт подается в верхний распределитель и стекает по трубному пучку, а хладоноситель движется внутри труб. Жидкий концентрат собирается внизу, после чего сформированный лед периодически отделяется ножами с возвратно-поступательным движением.

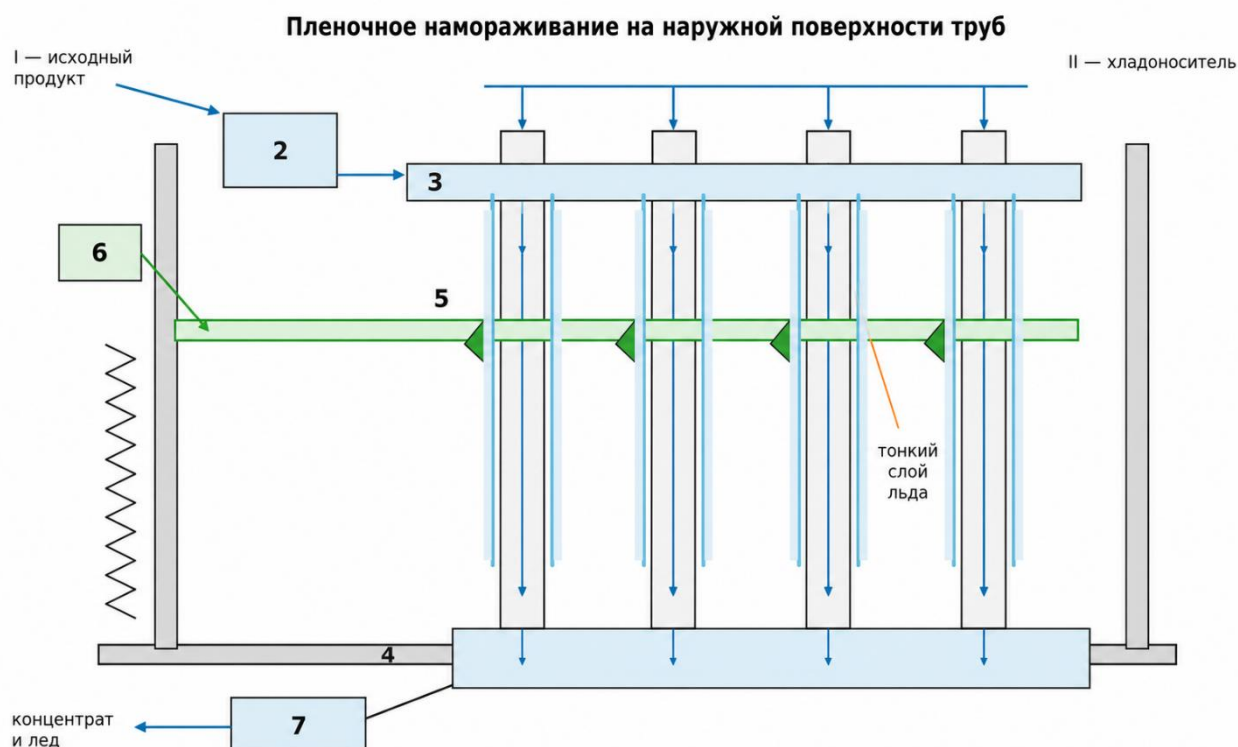


Рисунок 6 – Кристаллизатор с намораживанием льда на наружной поверхности труб [52]:
1 – теплообменные трубы; 2 – бак подачи; 3 – распределитель; 4 – приемник; 5 – ножи; 6 – привод; 7 – сборник.

Наружное намораживание обеспечивает большую удельную поверхность, допускает непрерывную подачу продукта и дает сравнительно высокую производительность. Рабочая сторона труб открыта для наблюдения и механической очистки. Вместе с тем направляющие, привод и система ножей увеличивают массу и число потенциально изнашиваемых узлов. Если лед и концентрат отводятся одним потоком, за аппаратом необходим дополнительный сепаратор.

Совершенствование пленочного трубного аппарата связано прежде всего с равномерным смачиванием каждой трубы, подвижным или подпружиненным ножом, раздельным сбором фаз, модульным креплением пучка и автоматической мойкой. Пленка должна оставаться сплошной, но не быть избыточно толстой, иначе возрастает сопротивление со стороны продукта. Сменный распределитель позволяет изменять проходные сечения под вязкость жидкости и содержание взвешенных частиц.

К режущему механизму предъявляются три основных требования: износостойкость, постоянство зазора и компенсация возможного биения поверхности. В модернизированном льдогенераторе вместо скребка, требующего частой заточки, использованы долговечные винтовые фрезы, скалывающие лед вдоль подложки [18]. Подобный узел может применяться и в криоконцентраторе, если разрушение льда не приводит к дополнительному уносу жидкого продукта.

2.4. Аппараты с внутренним намораживанием льда

Когда лед растет на внутренней стенке вертикальной трубы, концентрат сохраняется в ее центральном проходе и после завершения цикла может быть слит самотеком. Типовой

аппарат такого вида, приведенный на рисунке 7, описан в патенте [53]. По межтрубному пространству сначала подают хладоноситель для кристаллизации, а затем теплую среду, обеспечивающую отделение или плавление льда.

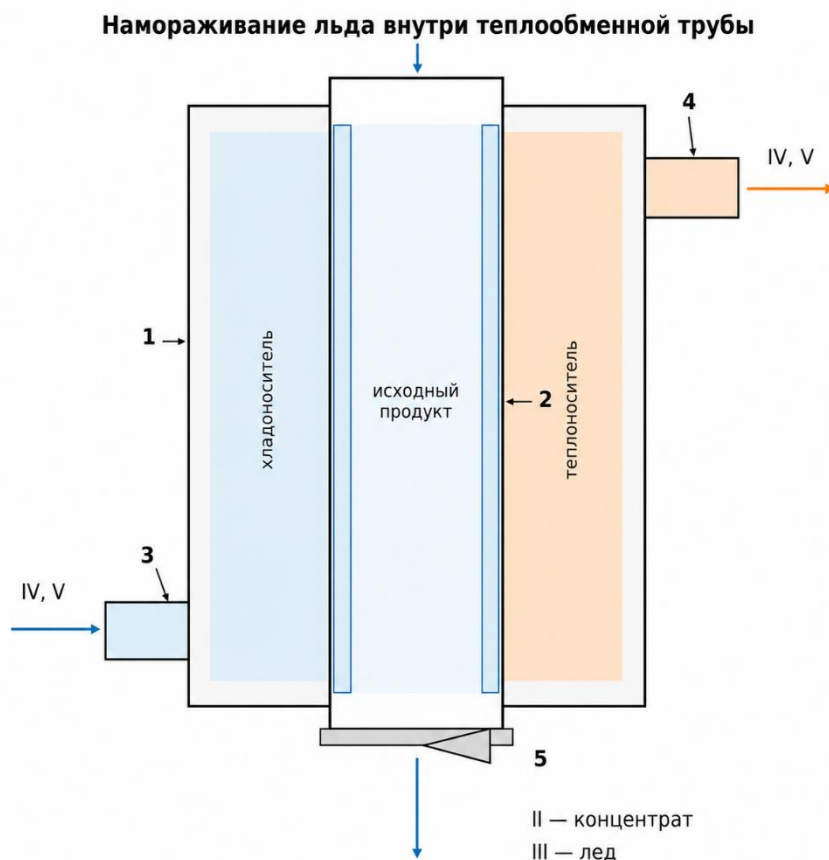


Рисунок 7 – Кристаллизатор с внутренним намораживанием льда [53]:
1 – корпус; 2 – теплообменная труба; 3 – входной патрубок; 4 – выходной патрубок; 5 – задвижка; I – сырье; II – концентрат; III – лед; IV – хладоноситель; V – теплоноситель.

Вертикальная компоновка использует силу тяжести при выгрузке обеих фаз. Сходные решения приведены в патентах [54–56]. Если свойства продукта или условия монтажа требуют горизонтальной ориентации, применяют однетрубный аппарат [57] либо многотрубную конструкцию с небольшим уклоном [58].

Двухтрубная конструкция проста, дает возможность точно назначить площади проходных сечений и удобна в лабораторных или малотоннажных установках. Ее слабые стороны – большая масса на единицу теплопередающей поверхности и неравномерность скорости в широком кольцевом канале. Многотрубный модуль компактнее, но нуждается в коллекторах и средствах выравнивания расхода между параллельными трубами.

Различные многотрубные варианты защищены патентами [20, 59, 60]. В последнем из них два трубных модуля включены в обратимый теплонасосный цикл: пока в одном идет замораживание продукта, во втором плавится лед, полученный на предыдущей стадии. Такая регенеративная работа уменьшает внешний тепловой поток и соответствует принципу повторного использования холода ледяного блока [32].

Надежность многотрубного аппарата повышается, если число параллельных каналов в одном модуле ограничено, на коллекторах предусмотрены балансирующие элементы, температура контролируется на выходе отдельных ветвей, а каждый канал можно промыть

независимо. Производительность крупной установки лучше увеличивать подключением одинаковых модулей, чем постоянным ростом диаметра единственного корпуса.

В таблицу 8 сведены основные преимущества и недостатки трубчатых кристаллизаторов.

Таблица 8 – Сопоставление трубчатых кристаллизаторов

Схема	Преимущества	Недостатки	Приоритет совершенствования
Наружное пленочное намораживание	Высокая производительность, доступность поверхности	Сложный ножевой узел, совместный отвод льда и концентрата	Равномерная пленка, подвижный скребок, отдельный отвод фаз
Внутреннее одноструйное намораживание	Простота, гравитационная выгрузка, малая удерживаемая масса	Низкая компактность, периодический режим	Оптимизация кольцевого зазора, регенеративный цикл оттаивания
Внутреннее многоструйное намораживание	Высокая удельная поверхность, модульность	Плохое распределение потоков, сложность коллекторов	Балансировка каналов, секционирование, автоматическая промывка
Горизонтальная труба	Удобство привода и компоновки	Неполное дренирование, зависимость от угла наклона	Управление уклоном, дренажом и съемом слоя льда

Данные таблицы 8 позволяют выделить области рационального применения трубчатых кристаллизаторов и определить, какие элементы их конструкции требуют дальнейшей доработки.

2.5. Выравнивание потока в межтрубном пространстве

Аппараты с внутренним намораживанием во многом повторяют двухтрубные и кожухотрубчатые теплообменники. Двухтрубные варианты исследованы в работах [61–63], кожухотрубчатые - в публикациях [64–67]. Полученные результаты показывают, что форма проходного сечения и равномерность поля скорости иногда оказывают на процесс большее влияние, чем простое наращивание поверхности [36, 39, 40, 42, 44].

Назначение интенсификатора состоит в том, чтобы обновлять пристенный слой и перемешивать хладоноситель без чрезмерного роста сопротивления. Полые элементы описаны в патенте [68], продольные и поперечные ленточные вставки - в работах [61, 62, 69–71], а вращающиеся спиральные ленты и трубы - в решениях [72–74]. Для каждого варианта требуется сопоставлять тепловой выигрыш с дополнительной насосной нагрузкой.

Стержневые интенсификаторы различного поперечного сечения показаны на рисунке 8.

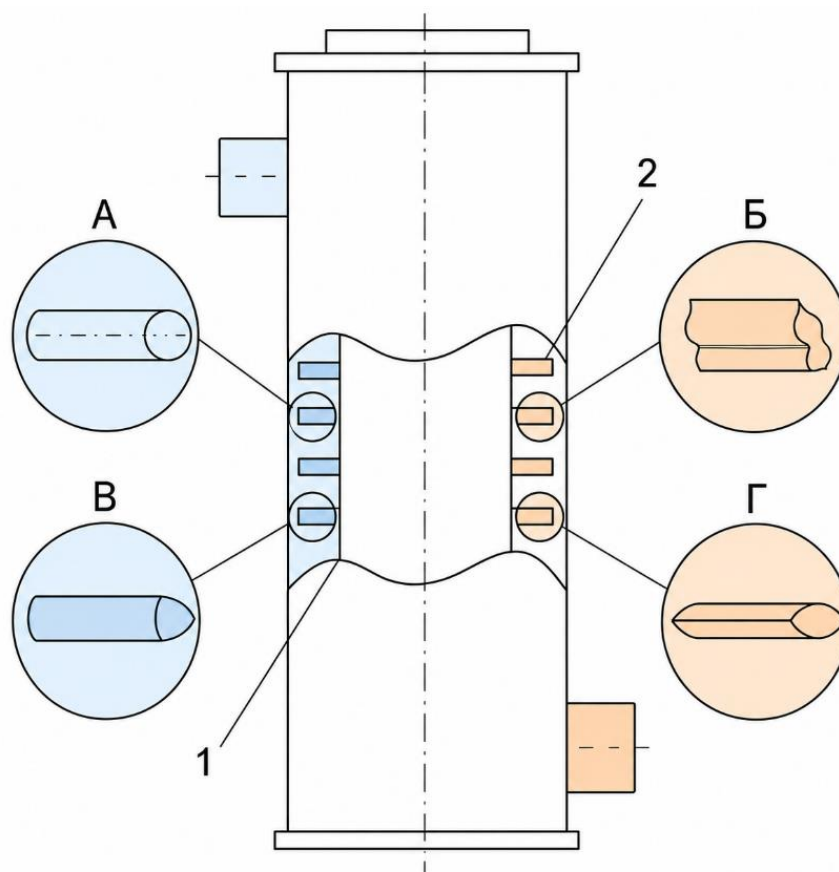


Рисунок 8 – Варианты интенсификаторов теплообмена:

1 – теплообменная труба; 2 – интенсификаторы; А – круглое сечение [75]; Б – ω -образное [76]; В – треугольник Рёло [77]; Г – два треугольника Рёло [78].

Круглый элемент соответствует патенту [75], ω -образный - патенту [76], стержень в форме треугольника Рёло - патенту [77], а сочетание двух таких треугольников - патенту [78]. Исследования ребер, вставок и гофрированных каналов подтверждают возможность заметно повысить теплоотдачу. Одновременно они показывают рост гидравлического сопротивления и сильную зависимость результата от размеров и расположения элементов [37, 38, 45–47, 79–81].

Для кристаллизатора предпочтительны вставки, после остановки не удерживающие хладоноситель, не создающие глухих полостей и доступные для механической либо химической очистки. При выборе формы необходимо сравнивать увеличение коэффициента теплоотдачи с изменением удельной потребляемой мощности. Если требуемый тепловой эффект достигается лишь резким повышением скорости потока, эксплуатационный выигрыш может исчезнуть.

Практический расчет начинают с поля скорости в исходном кольцевом канале. После выявления участков слабой циркуляции интенсификаторы размещают локально и повторно определяют перепад давления. Полное заполнение межтрубного пространства вставками оправдано лишь при чистом хладоносителе. Для загрязняющихся контуров безопаснее разреженные элементы, плавные направляющие и секционирование корпуса.

2.6. Перегородки, профильные трубы и структурированные поверхности

Сегментные перегородки увеличивают длину пути и заставляют хладоноситель поперечно обтекать трубы; соответствующие конструкции приведены в патентах [82–85]. Перфорированные и спиральные варианты рассмотрены в работах [86–91]. Сходный прием для двухтрубного аппарата предложен в патенте [92].

Перегородки выравнивают скорости, но делают корпус сложнее в изготовлении и хуже дренируемым. Для низкотемпературной установки особенно опасны замкнутые объемы, где оставшаяся при остановке жидкость может замерзнуть. Поэтому в сегментах нужны дренажные отверстия, а даже при аварийном обмерзании путь потока не должен перекрываться полностью.

Увеличить компактность можно и без внутренних вставок - за счет большего периметра трубы при неизменной площади ее поперечного сечения. Четырехкасповый эпициклоидный профиль защищен патентом [93], восьмилепестковый эпитрохоидный - патентом [94]. Кристаллизаторы с такими теплообменными трубами рассмотрены в работах [95–101] и показаны на рисунке 9.

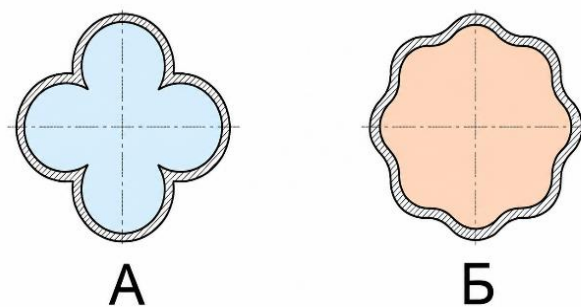


Рисунок 9 – Профильные теплообменные трубы:

А – эпициклоида с четырьмя каспами по патенту [93]; Б – эпитрохоида с восемью лепестками по патенту [94].

Профилирование увеличивает теплопередающую поверхность без присоединения отдельных деталей; нужную форму можно получить прокаткой круглой заготовки. Вместе с тем уменьшается гидравлический диаметр внутреннего канала, углубления сложнее очищать, а лед по периметру способен расти неравномерно. Поэтому глубину профиля выбирают по совместному расчету теплопередачи и сопротивления, дополнительно проверяя возможность снять сформированный ледяной элемент.

В патентах [102–109] предложены поверхности с системой каналов и углублений. Такой рельеф увеличивает площадь и нарушает устойчивость пристенного слоя, но одновременно меняет смачивание и силу сцепления льда со стенкой. Численное моделирование переохлажденных капель показывает, что ширина и направление канавок способны влиять на площадь растекания, вероятность отскока и продолжительность затвердевания [13].

Поле скорости зависит не только от формы трубы, но и от того, как выполнены вход и выход. Нетипичные углы и варианты подвода потока описаны в патентах [110–112]. Если

патрубок имеет сечение меньше эквивалентного прохода межтрубного пространства, локальное сопротивление коллектора может свести на нет преимущества развитой поверхности. Поэтому его диаметр назначают не ниже соответствующего гидравлического диаметра канала.

2.7. Совершенствование механизмов удаления льда и непрерывная работа

Производительность установки определяется скоростью удаления льда не в меньшей степени, чем мощностью холодильной машины. Полное оттаивание надежно и конструктивно просто, однако каждый цикл требует нагрева стенки и сопровождается частичным плавлением полезного льда. Скребок обеспечивает непрерывную работу, но нуждается в постоянном зазоре, прочной кромке и защите поверхности от задиров. Вибрация или деформация позволяют уменьшить адгезию без непрерывного контакта ножа, зато усложняют герметизацию подвижных элементов.

В роторной машине лед отделяют сразу после выхода смоченной поверхности из ванны. Применение винтовых фрез вместо обычного скребка направлено на увеличение ресурса и сокращение остановок для заточки [18]. В специализированном барабанном аппарате для эфирно-масличных дистиллятов предусмотрены капельная подача, вакуумирование, ножевой сьем и отдельные приемники для эфирного масла и замороженного гидролата; конструкция защищена патентом [35].

Карусельная схема разделяет путь рабочей пластины на самостоятельные зоны: нанесение продукта, намораживание, стекание концентрата и снятие льда. Патент [20] и созданный для такой установки мехатронный модуль [34] показывают, как в одной конструкции объединяются рекуперация, регулируемое движение пластин и контроль промышленной безопасности. При непрерывном общем потоке отдельные операции остаются пространственно разнесенными.

При обработке пищевых жидкостей желательно сразу после отделения увести лед от маточного раствора. Перед механическим воздействием остаточной пленке дают стечь, а твердая фаза направляется в самостоятельный лоток. Для пастообразного продукта или среды со взвешенными частицами кромка должна самоочищаться, а весь узел - быстро разбираться для мойки и осмотра.

Полное оттаивание можно заменить двухступенчатым отделением. Короткий тепловой импульс расплавляет лишь тонкий контактный слой и ослабляет сцепление со стенкой, после чего лед снимается небольшим усилием. Такой прием требует меньше теплоты и снижает нагрузку на нож. Источником импульса может служить горячий газ после компрессора, отдельный теплый теплоноситель или возвращаемая теплота конденсации.

2.8. Совершенствование холодильной системы и энергетическая интеграция

Эксергетический расчет циклической установки выявил наибольшие потери при дросселировании и конденсации; эксергетический КПД экспериментальной системы составил 23,4% [6]. Тем самым подтверждается, что существенный резерв находится за пределами рабочей емкости - в выборе структуры и режима холодильного цикла.

К основным мерам относят повышение температуры кипения до максимально допустимого уровня, снижение температуры конденсации, плавное регулирование компрессора, сокращение числа пусков, возврат теплоты конденсации и использование холода

льда до его плавления. В multifunctionальной блочной установке совместная настройка геометрии и режима, рециклинг льда и частотное управление уменьшили энергетические затраты примерно на 25% [32].

Теплоту конденсатора можно использовать для отделения льда, подогрева промежуточного теплоносителя и других низкотемпературных нужд. Если установка содержит два одинаковых модуля, в одном из них хладагент кипит и замораживает продукт, а во втором конденсируется и плавит ранее полученный лед. Затем назначение модулей меняют. В результате уменьшается сброс теплоты в окружающую среду и сокращается вспомогательная стадия.

В вакуумно-испарительной схеме рабочим веществом служит сама вода, что позволяет совмещать охлаждение, замораживание и получение бинарного льда [14]. Для пищевых продуктов такое охлаждение может протекать интенсивно при невысокой температуре [15]. Отсутствие промежуточной стенки привлекательно и для разделительного вымораживания, однако установка нуждается в надежном улавливании паров, сохранении летучих ароматических веществ и развитом вакуумном оборудовании.

В таблицу 9 сведены энергетические меры и ожидаемый эффект от их внедрения.

Таблица 9 – Энергетические меры и ожидаемый эффект

Мера	Энергетический эффект	Технологический эффект	Возможное ограничение
Частотное регулирование компрессора и насосов	Снижение энергозатрат при частичной нагрузке	Стабильная температура и толщина льда	Стоимость привода и системы управления
Рекуперация теплоты конденсации	Сокращение внешнего нагрева	Быстрое отделение льда, подогрев теплоносителя	Необходимость согласовывания тепловых режимов
Два реверсивных кристаллизационных модуля	Использование теплоты одного модуля в другом	Совмещение кристаллизации и плавления	Сложная арматура и алгоритм переключения
Предварительное охлаждение сырья	Снижение пиковой нагрузки	Меньшее время до начала кристаллизации	Дополнительный теплообменник
Рециклинг холода льда	Переохлаждение хладагента или сырья	Повышение общей эффективности	Необходимость чистого потока хладоносителя
Улучшение теплоизоляции	Снижение теплопритоков	Более стабильный режим	Увеличение габаритов и стоимости конструкции

Холодильный коэффициент - лишь один из критериев выбора хладагента. Также учитывают экологические ограничения, безопасность, химическую совместимость и возможность изолировать рабочее вещество от продукта. Вторичный контур повышает санитарную безопасность и облегчает распределение холода между модулями, но добавляет температурный перепад и расход энергии на насос. Его целесообразность проверяют по полному балансу установки, а не по характеристике одного компрессора [113].

2.9. Автоматизация, мехатроника и цифровое проектирование

Автоматика должна управлять не одной установленной температурой, а текущим состоянием процесса. Для этого измеряют температуры продукта, стенки и хладоносителя, давление кипения, расходы и потребляемую мощность. Концентрацию оценивают по плотности, показателю преломления или электропроводности. Положение фронта может быть

рассчитано из теплового баланса либо определено по ультразвуковому сигналу и изменению массы рабочего элемента.

Для цилиндрической поверхности математическая модель связывает толщину льда с температурой стенки, криоскопической температурой жидкости и размерами аппарата [31]. Опыты на емкостных криоконцентраторах подтверждают, что скорость роста слоя со временем уменьшается нелинейно [49]. Если канал имеет сложный профиль, требуется численное решение сопряженной задачи тепло- и массопереноса с подвижной межфазной границей.

Мехатронный модуль включает измерительные каналы, исполнительные механизмы, логику переключения технологических зон и диагностику. В карусельном криоконцентраторе регулируются скорость пластин, температурный режим, длительность стекания и момент снятия льда. Разработка такого модуля показала возможность совместить рациональные параметры кристаллизации с требованиями промышленной безопасности [34].

Алгоритм перспективной установки может быть построен в несколько уровней. Сначала стабилизируют давление кипения, затем регулируют температуру хладоносителя, рассчитывают текущий состав продукта и оценивают толщину и чистоту льда. На верхнем уровне выбирают скорость рабочей поверхности или длительность цикла. Стадию заканчивают в точке минимального прогнозируемого удельного энергопотребления при допустимой концентрации примесей в твердой фазе.

Расчетный двойник сохраняет практическую ценность только при регулярном уточнении по данным действующей установки. Коэффициенты теплопередачи, степень загрязнения и сила сцепления льда со временем меняются, поэтому неизменная модель постепенно расходится с реальным процессом. Сопоставление измеренного и расчетного тепловых потоков позволяет обнаруживать образование отложений, износ скребка и нарушение распределения хладоносителя.

2.10. Адаптация конструкции к свойствам разделяемой жидкости

В таблице 10 обобщены направления совершенствования, наиболее значимые для разных групп жидких сред.

Таблица 10 – Приоритеты совершенствования кристаллизации

Среда	Главный критерий	Предпочтительный аппарат	Специальные требования
Соки	Сохранение ароматических веществ и снижение уноса мякоти	Тонкоплочный барабанный или пластинчатый аппарат	Мягкий съем, мойка, равномерное распределение пленки
Молочная сыворотка	Минимальные потери белка и лактозы	Емкостный многоступенчатый или карусельный аппарат	Низкая шероховатость, малые сдвиговые нагрузки, безразборная мойка
Морская и минерализованная вода	Чистота льда и степень обессоливания	Трубный каскад с промывкой и частичным плавлением льда	Дренирование рассола, коррозионная стойкость
Промышленные стоки	Извлечение воды и ценных компонентов	Модульный аппарат с предварительным отделением осадка	Стойкость к загрязнению, широкие каналы, разборная очистка

Среда	Главный критерий	Предпочтительный аппарат	Специальные требования
Эфирно-масличные среды	Сохранение летучей масляной фазы	Вакуумируемый вращающийся барабан	Раздельные приемники, каплеотбойник, герметичность

Сопоставление данных таблицы 10 показывает, что приоритеты проектирования определяются прежде всего свойствами перерабатываемой жидкости.

2.10.1. Соки и другие растительные экстракты

Для фруктовых соков требуется прежде всего сохранить летучий аромат и не допустить попадания мякоти в лед. Этим условиям отвечают тонкопленочные барабанные и пластинчатые аппараты с относительно мягким съемом. Проходные сечения выбирают с учетом пектиновых веществ и взвесей, а распределитель должен создавать сплошную пленку без застойных участков.

2.10.2. Молоко и молочная сыворотка

При работе с молочными средами ограничивают местное переохлаждение и сдвиговые нагрузки. В сыворотке одновременно с ростом концентрации лактозы может выпадать белковый осадок, поэтому режим оценивают по составу концентрата, а не только по массе льда [27]. Для творожной сыворотки наиболее эффективным оказался сравнительно мягкий температурный режим поверхности, при котором потери сухих веществ были минимальны [28].

Молочный аппарат должен иметь гладкие сварные швы, полностью опорожняться и не содержать тупиковых полостей; обязательна безразборная мойка. Скребок и его направляющие не должны быть источником металлических частиц. Модульная компоновка упрощает санитарное разделение потоков и снижает риск перекрестного загрязнения.

2.10.3. Вода, рассолы и промышленные стоки

При опреснении и деминерализации определяющим показателем становится состав льда. Чистую водную фракцию получают при медленном росте плотного слоя, последующем стекании рассола, промывке и частичном плавлении. Многофункциональная энергоэффективная установка способна совмещать концентрирование раствора, деминерализацию воды и производство льда [32]. Если перерабатываются вторичное сырье или стоки, конструкция должна также учитывать выпадение пектиновых, жировых и минеральных веществ [30].

2.10.4. Эфирно-масличные и специальные среды

В эфирно-маслических дистиллятах важно сохранить летучие вещества и отдельно собрать жидкую масляную фазу. В патенте [35] для этого предусмотрены капельное нанесение на вращающийся барабан, каплеотбойник, подключение вакуума и приемник масла, расположенный до сборника замороженного гидролата. Такой пример показывает, что компоновка кристаллизатора должна соответствовать конкретной последовательности разделения фаз, а не только общему принципу намораживания.

2.11. Комплексная концепция перспективного кристаллизатора

На основе рассмотренных решений можно сформулировать требования к промышленному кристаллизатору нового типа. Установка собирается из унифицированных модулей с небольшим удерживаемым объемом. Рабочая поверхность должна быть развитой, но оставаться доступной для очистки; расход хладоносителя по каждому модулю регулируется отдельно. Необходимы датчики температуры и концентрации, быстрый узел отделения льда и самостоятельные тракты для концентрата, промывной воды и талой фракции.

В качестве исходной компоновки целесообразна реверсивная пара модулей. В первом в данный момент образуется лед, а во втором теплота конденсации используется для отделения твердой фазы, полученной в предыдущем цикле. После дренирования функции меняются. Требуемую производительность получают подключением дополнительных одинаковых пар, сохраняя близкие тепловые и гидравлические условия и не усложняя масштабирование одного корпуса.

Форма рабочей поверхности зависит от характера среды. Для чистого маловязкого раствора допустимы профилированные и структурированные трубы, повышающие компактность. Вязкий пищевой продукт предпочтительнее обрабатывать на гладкой поверхности с регулируемой адгезией и надежным механическим съемом. Загрязненные потоки требуют широких проходов, обратной промывки и минимального количества внутренних деталей.

Автоматика должна удерживать рациональную разность температур, а не постоянно стремиться к самому низкому значению. По мере сгущения продукта изменяются давление кипения, расход хладоносителя и скорость рабочей поверхности. Решение о завершении цикла принимается по совокупности толщины льда, удельной мощности и прогнозируемой чистоты разделения. Тем самым в одном алгоритме связываются технологические, энергетические и конструктивные ограничения.

Еще до изготовления аппарата варианты следует сравнивать по нескольким группам затрат и свойств: капитальной стоимости, массе, энергопотреблению, потерям растворенных веществ, удобству мойки и ремонтпригодности. Максимальный коэффициент теплоотдачи не оправдывает конструкцию, если для него нужен сложный привод, существенно возрастает напор насоса или появляются недоступные санитарной обработке полости.

2.12. Выводы по главе 2

Итак, совершенствование кристаллизатора носит многокритериальный характер. Наряду с удельным тепловым потоком учитываются энергия на единицу передаваемой мощности, материалоемкость, компактность и фактическая селективность разделения.

В аппаратах с наружным намораживанием основное внимание следует уделять равномерной пленке, надежному съему и раздельному отводу льда и жидкости. Для внутреннего трубного намораживания особенно важны рациональный кольцевой зазор, выгрузка под действием силы тяжести и оттаивание с возвратом теплоты.

Перегородки, вставки и профилированные либо структурированные трубы способны увеличить теплоотдачу и удельную поверхность. Их преимущество, однако, подтверждается только после учета перепада давления, загрязняемости, доступности мойки и сцепления льда со стенкой.

Непрерывность процесса обеспечивается развитием барабанных, карусельных и многоповерхностных схем, увеличением ресурса режущих механизмов, применением короткого импульсного оттаивания и самостоятельными путями отвода концентрата и твердой фазы.

Наибольший резерв экономии энергии связан с реверсивной работой двух модулей, использованием теплоты конденсации, возвратом холода льда и частотным регулированием компрессора и циркуляционных насосов.

Глава 3. Разработка и анализ новых конструкций кристаллизаторов

Переход от общей идеи совершенствования к рабочей конструкции требует согласовать несколько групп требований. Развитая теплопередающая поверхность и равномерное температурное поле должны сочетаться со свободным выходом льда, полным сливом концентрата, возможностью безразборной мойки и устойчивой работой холодильного контура. Поэтому ни коэффициент теплоотдачи, ни производительность сами по себе не дают достаточной оценки. Необходимы показатели, которые соотносят тепловую мощность с массой и габаритами аппарата, полезным объемом и затратами на движение рабочих сред.

В главе анализируется разработанное семейство емкостных аппаратов, где лед образуется на внутренней стенке труб. Исходная двухступенчатая компоновка дополнена предварительным охлаждением продукта и использованием холода талой воды. Следующие варианты предусматривают профилирование труб и размещение интенсификаторов снаружи. Для оценки использованы опытные данные по кинетике льдообразования, результаты численного расчета течения и теплопередачи и соответствующие патентные решения [53, 95–101, 114–118].

Предложенные аппараты предназначены для водных растворов пищевой, химической и биотехнологической природы, а также для опреснения. Увеличение поверхности и улучшение обтекания достигаются без такого уменьшения внутреннего прохода, которое помешало бы слить концентрат или извлечь лед. Поэтому разработки образуют не набор несвязанных вариантов, а параметрическое семейство. Конкретное сечение и компоновка выбираются по составу жидкости и условиям эксплуатации.

3.1. Постановка задачи и критерии разработки

Исходной моделью служит вертикальный аппарат типа «труба в трубе». Продукт заполняет внутреннюю теплообменную трубу, а хладоноситель движется по кольцевому зазору. Лед нарастает изнутри; после удаления концентрата его отделяют короткой подачей теплой среды. Схема проста, герметична и формирует удобный трубчатый ледяной элемент. Вместе с тем круглое сечение имеет сравнительно небольшой периметр, а скорость хладоносителя по кольцевому каналу распределяется не вполне равномерно [31, 49, 119].

При неизменных габаритах увеличение теплопередающей поверхности создает предпосылку для роста мощности, но фактический результат определяется также коэффициентом теплопередачи и перепадом давления. Для сопоставления вариантов использованы два показателя энергомассовой эффективности – удельная мощность и удельная материалоемкость; в обоих случаях более выгодной считается меньшая величина. Такой подход не позволяет принять за конструктивный эффект обычное увеличение размеров аппарата.

Расширенная методика включает еще пять удельных показателей [119]. Тепловую мощность относят к массе и габаритному объему аппарата, к суммарным потерям мощности при перекачивании сред и к максимальному объему продукта; отдельно определяют потери мощности на единицу этого объема. В результате одна система оценки охватывает массу конструкции, компактность, потенциальную производительность и эксплуатационные затраты.

Несколько критериев необходимы потому, что одно и то же изменение дает разнонаправленные последствия. Стержни на трубе увеличивают поверхность и выравнивают течение, но добавляют металл, сварные швы и сопротивление. Профилированная труба обычно слабее возмущает поток, зато почти не меняет массу, сохраняет свободный внутренний проход и может быть получена деформированием круглой заготовки. Поэтому предпочтительный вариант определяется балансом характеристик, а не рекордом по одному показателю.

3.2. Базовая двухступенчатая конструкция с предварительным охлаждением

Основой нового семейства принят двухступенчатый емкостный криоконцентратор по патенту [53]. Он отличается от одноступенчатого наличием двух коллекторов труб, промежуточного теплоизолированного бака для полуконцентрата, двух поворотных столов и общего узла приема и промывки льда. После предварительного охлаждения жидкость поступает на первую ступень. Полученный полуконцентрат передается на вторую, где температуру хладоносителя и время работы назначают уже с учетом пониженной криоскопической температуры.

Исходный бак снабжен змеевиком предварительного охлаждения. По нему циркулирует вода, которая отдала тепло полученному льду и тем самым охладилась. Часть холода, обычно теряемая при промывке и плавлении, возвращается к следующей партии. При этом талая вода не соприкасается с продуктом; при необходимости между ними организуется отдельный промежуточный контур, что особенно важно для пищевых и фармацевтических жидкостей.

Нижние торцы рабочих труб обеих ступеней закрываются крышками с эластичными уплотнениями. Во время намораживания они герметизируют объем. После слива жидкой фазы поворотный стол переводит трубы к разгрузке, крышки открываются, а короткий наружный прогрев уменьшает сцепление льда со стенкой. Трубчатый элемент выходит под собственным весом и разрезается ножевым устройством на фрагменты требуемого размера (рисунок 10).

Двухступенчатый ёмкостный криоконцентратор с предварительным охлаждением и рекуперацией холода



Рисунок 10 – Функциональная схема двухступенчатого емкостного криоконцентратора с предварительным охлаждением и возвратом холода

Двухступенчатая компоновка дает эффект не только за счет последовательного сгущения. В каждой трубе требуется сформировать более тонкий слой. Расчет удаления 50% исходной воды показывает, что в одной трубе диаметром 50 мм слой около 8 мм при принятых условиях образуется примерно за 18 мин. Если ту же задачу разделить между двумя ступенями, каждой достаточно около 3,4 мм льда, а расчетное время снижается до 6 мин - более чем втрое [120].

Полученное отношение времени справедливо для принятой геометрии, температуры хладоносителя и расчетной модели и не является универсальным коэффициентом. Общим остается физическое объяснение: тонкий лед оказывает меньшее термическое сопротивление, поэтому средний тепловой поток за цикл выше. Ступенчатая схема позволяет остановить рост до участка, где скорость резко падает, и раньше начать следующую операцию.

После первой ступени масса жидкости уменьшается, поэтому труб во втором модуле может быть меньше. Металл распределяется функционально: первая часть установки обеспечивает основной выход льда, вторая доводит продукт до требуемой концентрации. Для нового сырья соотношение площадей пересчитывают по материальному балансу и зависимости криоскопической температуры от состава.

Обе ступени можно подключить к одному холодильному контуру либо снабдить самостоятельными. Общая система дешевле и проще, однако требует балансировки расхода и температур. Раздельное холодоснабжение позволяет независимо вести стадии при заметно

различающемся составе продукта, но увеличивает количество насосов, регулирующей арматуры и измерительных каналов.

Для пищевой установки предпочтителен замкнутый оборот промывочной воды. После орошения льда поток фильтруется и снова направляется к змеевику предварительного охлаждения. Когда содержание растворенных веществ достигает допустимого предела, часть воды выводят на повторное вымораживание или санитарную обработку. Такая схема уменьшает потери продукта и одновременно делает температуру сырья перед первой ступенью более стабильной.

Масштабирование двухступенчатой системы удобнее выполнять подключением одинаковых секций. Увеличение диаметра отдельной трубы привело бы к более длительному росту толстого слоя, тогда как дополнительные параллельные трубы сохраняют прежний характерный размер теплопередачи. Модульный принцип упрощает проверку расчетов и позволяет направить одну секцию на мойку, не останавливая всю линию.

3.3. Динамика намораживания и выбор толщины ледяного слоя

Расчет аппарата начинается с описания движения межфазной границы. Для льда, растущего на внутренней цилиндрической поверхности, обобщенная зависимость толщины записывается в следующем виде [121]:

$$\xi = \beta \cdot \sqrt{\tau}, \quad (8)$$

где ξ – толщина слоя льда, м; β – фактор роста, зависящий от температурного напора, теплоотдачи и теплофизических свойств, $\text{м/с}^{0,5}$; τ – время намораживания, с.

Квадратный корень из времени в этой зависимости отражает постепенное увеличение сопротивления уже образовавшегося льда. Поэтому нарастить слой на одинаковую величину в конце цикла значительно труднее и дольше, чем в его начале.

Проверка модели для внутренней цилиндрической поверхности дала удовлетворительное совпадение с опытом. В емкостном криоконцентраторе на интервале 30–50 мин максимальное отклонение не превышало 8%, что позволяет использовать зависимость при предварительном назначении режима [49]. Предварительное охлаждение заметно ускоряло рост, поскольку часть чувствительной тепловой нагрузки выводилась за пределы рабочего цикла.

В проведенном опыте минимальные энергетические затраты соответствовали внутреннему слою толщиной 5–7,3 мм и продолжительности 22,5–31 мин [121]. Эти числа относятся только к заданным условиям. Другой хладоноситель, длина трубы, коэффициент теплоотдачи или ступенчатая схема смещают оптимум. Общим является критерий остановки: продолжать цикл не следует, когда падение выхода льда становится более существенным, чем полезный эффект от дальнейшей работы холодильной машины.

Для двухступенчатой линии приходится различать оптимум отдельной трубы и оптимум всей установки. Первый связан прежде всего с энергией намораживания. Второй дополнительно включает заполнение и слив, оттайку, переключение арматуры, промывку, перекачку полуконцентрата и загрузку холодильной машины. Поэтому слой около 3,4 мм на каждой ступени может оказаться выгоднее диапазона 5–7,3 мм для одиночной трубы, если он заметно сокращает полный цикл и допускает параллельную работу модулей.

От толщины и скорости роста зависит также состав льда. Большой температурный напор ускоряет процесс, но повышает вероятность замыкания межкристаллической жидкости. При умеренном продвижении фронта формируется более плотная структура, из которой

концентрат вытесняется легче. Следовательно, алгоритм должен ограничивать не только конечную толщину, но и темп ее изменения. Косвенными сигналами могут служить тепловой поток, электропроводность концентрата и перепад давления хладоносителя.

Цикл заканчивают после получения заданной массы льда при допустимом содержании примесей. В водоподготовке решающей является чистота твердой фазы; при сгущении пищевого продукта - сохранение аромата и минимальный унос сухих веществ. Поэтому даже для одинаковой толщины рациональная температура в этих двух задачах может быть различной.

Запас теплопередающей поверхности следует создавать увеличением длины зоны или числа параллельных труб, а не радиальной толщины льда. Дополнительная длина почти пропорционально увеличивает площадь и не изменяет сопротивление отдельного слоя. Утолщение, напротив, быстро уменьшает средний тепловой поток и требует больше теплоты и времени при последующем отделении.

3.4. Вычислительная модель типовой конструкции

Для численного сопоставления была построена модель двухтрубного аппарата. У типовой круглой трубы без учета фазового перехода поверхность составляла $0,110 \text{ м}^2$, а масса конструкции - 10,49 кг. При объемном расходе $4,506 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ расчетный перепад давления в кольцевом пространстве равнялся 1137 Па; на перекачивание хладоносителя требовалось 0,513 Вт.

В круглой кольцевой щели скорость распределяется асимметрично. Возле патрубков и в верхней части сечения возникает более быстрый поток, тогда как на противоположной стороне сохраняется область медленного движения. Из-за этого локальные коэффициенты теплоотдачи различаются. При намораживании следствием становится неодинаковая толщина льда по периметру, что затрудняет выход ледяного элемента и повышает вероятность местного примерзания.

Численный расчет дает возможность увидеть структуру течения и оценить сопротивление еще до изготовления стенда. Однако прогноз теплопередачи при образовании льда требует экспериментального подтверждения. Положение фронта, меняющаяся вязкость концентрата, естественная конвекция и включение растворенных веществ задаются в модели с существенно большей неопределенностью [119, 122].

На рисунке 11 приведены поля скорости для трех вариантов. В исходной круглой геометрии сохраняется выраженная область слабого движения. Стержни делят кольцевое пространство на связанные зоны и делают поток более равномерным, одновременно увеличивая поверхность трения. Восьмилепестковая труба перераспределяет проходное сечение и возмущает течение без приварных деталей.

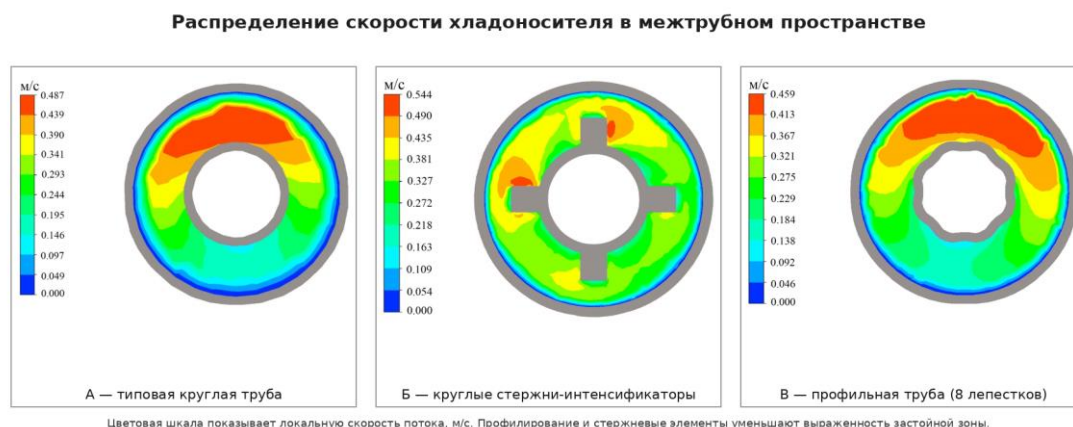


Рисунок 11 – Распределение скорости хладоносителя в поперечном сечении типовой, интенсифицированной и профилированной конструкций кристаллизаторов

При использовании результатов расчета необходимо учитывать ориентацию аппарата. В горизонтальной трубе на положение льда влияют гравитационное расслоение и естественная конвекция. Для вертикальной компоновки существенны гидростатический напор и направление движения хладоносителя. Поэтому надежный проект предполагает расчет нескольких положений и последующую проверку на модульном стенде.

3.5. Кристаллизаторы со стержневыми интенсификаторами

В первом варианте интенсификации стержни закрепляются снаружи теплообменной трубы. Внутреннее размещение исключено, поскольку такие элементы удерживали бы лед и мешали его выходу. Наружные стержни увеличивают площадь и возмущают поток хладоносителя, сохраняя гладкой поверхность, непосредственно контактирующую с продуктом.

В расчет были включены четыре формы стержня: круглая по патенту [75], треугольник Рёло по патенту [77], сочетание двух треугольников Рёло по патенту [78] и квадрат. Для всех вариантов высота составляла 6 мм, шаг между центрами - 50 мм, общее число элементов - 108. Материал конструкции и расход хладоносителя принимались такими же, как в исходной модели [122]; результаты приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Энерго-массовая эффективность кристаллизаторов

Конструкция	Изменение удельной мощности, относительно типовой конструкции	Изменение удельной материалоемкости, относительно типовой конструкции
Круглые стержни	Улучшение на 0,6%	Улучшение на 9,1%
Треугольник Рёло	Улучшение на 0,1%	Улучшение на 8,1%
Два треугольника Рёло	Улучшение на 4,8%	Улучшение на 7,3%
Квадратные стержни	Ухудшение на 5,1%	Улучшение на 8,5%

После установки круглых стержней теплопередающая поверхность увеличилась до 0,122 м², а масса аппарата - до 10,64 кг. Перепад давления в межтрубном пространстве

составил 1261 Па. Несмотря на его рост, удельная мощность уменьшилась на 0,6%, а показатель удельной материалоемкости улучшился на 9,1% по сравнению с типовой конструкцией.

Минимальная удельная мощность была получена для стержня, образованного двумя треугольниками Рёло. Такая геометрия лучше направляла хладоноситель и сокращала области низкой скорости. По материалоемкости этот вариант, однако, уступил круглым стержням: при сопоставимой добавленной массе прирост поверхности оказался несколько меньше. Квадратное сечение дало противоположный результат - удельная мощность возросла, поэтому по данному критерию оно оказалось невыгодным.

Расчеты подтверждают, что одна только дополнительная площадь не обеспечивает снижения эксплуатационных затрат. Элемент должен одновременно развивать поверхность и перераспределять поток, не вызывая чрезмерного перепада давления. Поэтому разные формы становятся предпочтительными при разных приоритетах: одна лучше по энергии на перекачивание, другая - по массе конструкции.

Слабое место стержневой схемы - большое количество мест крепления. Сварка повышает трудоемкость, требует контроля каждого шва и может деформировать тонкую трубу. Механическое соединение, в свою очередь, создает щели и контактное термическое сопротивление. Наружные элементы также затрудняют осмотр кольцевого канала и предъявляют более жесткие требования к промывке хладоносительного контура.

Поэтому стержни оправданы прежде всего там, где выравнивание потока дает решающий эффект и усложнение изготовления допустимо: в компактных высоконагруженных модулях, опытных установках и аппаратах для химических сред с чистым хладоносителем. Для санитарных пищевых линий более простым решением может быть бесшовное профилирование самой трубы.

3.6. Профилирование теплообменной трубы

Во втором варианте наружные детали не добавляются: изменяется поперечное сечение теплообменной трубы при сохранении общего габарита аппарата. Круглая заготовка формуется вальками, вследствие чего ее периметр возрастает и меняется форма кольцевого канала, а масса остается практически прежней. Отсутствие приварных элементов уменьшает число возможных дефектов и делает серийное изготовление проще.

Для восьмилепестковой укороченной эпитрохоиды, соответствующей патенту [94], расчетная поверхность составила 0,111 м² при массе 10,49 кг, то есть такой же, как у типового аппарата. Гидравлическое сопротивление межтрубного пространства было равно 1147 Па.

Относительно круглой трубы удельная мощность уменьшилась приблизительно на 0,5%, а удельная материалоемкость - на 1,34%. Выигрыш уступает результату со стержнями, однако достигается без многочисленных соединений и заметного усложнения конструкции.

Профилирование также ослабляет неравномерность скорости. Лепестки создают по периметру чередование более широких и узких участков кольцевого зазора, вследствие чего единая застойная область дробится. Внутренняя поверхность при этом остается непрерывной: лед образует цельный профилированный трубчатый элемент и после короткого оттаивания может выйти из канала.

Форма этих труб основана на кинематическом построении циклоидальных кривых. Эпициклоиды и эпитрохоиды описываются параметрически через качение окружностей, поэтому профиль можно изменять выбором радиусов и соотношения угловых скоростей [123].

Для внутреннего канала недопустимы обратные углы и чрезмерно глубокие впадины: они удерживают жидкость после слива и мешают выходу льда. Предпочтительны плавные контуры с ограниченной амплитудой, достаточным минимальным проходом и близкой толщиной стенки после формовки. Этим требованиям соответствуют циклоидальные кривые, кардиоиды, нефроиды и фигуры постоянной ширины.

Технологичность профилированной трубы определяется утонением стенки в вершинах и сохранением прямолинейности оси. После формовки требуются гидравлическое испытание, измерение шероховатости внутренней поверхности и проверка безразборной мойки. Если заготовка сварная и аппарат предназначен для пищевой среды, продольный шов не следует располагать в зоне максимальной деформации профиля.

Разные ступени установки можно различать не только режимом, но и геометрией труб. Например, на первой ступени, где объем продукта больше, целесообразен умеренный профиль с широким проходом. Во второй ступени допускается более развитое сечение, рассчитанное на концентрат с пониженной криоскопической температурой. Таким способом тепловая нагрузка и гидравлическое сопротивление распределяются между модулями.

Профилирование требует специальной формующей оснастки и контроля размеров. При единичном или малосерийном изготовлении стоимость валков может оказаться сопоставимой с экономией металла. Поэтому рациональнее создавать параметрический ряд: общие корпус, патрубки, крышки и поворотные столы комплектуются сменными трубами разных профилей. Такой принцип положен в основу разработанного патентного семейства.

3.7. Патентное семейство профилированных кристаллизаторов

Патентное семейство включает укороченные эпитрохоиды, эпициклоиды и многоугольники Рёло. Во всех вариантах сохраняются двухступенчатая схема, предварительное охлаждение, поворотные столы и промывка льда; меняется только поперечное сечение теплопередающих труб [53, 95–101, 114–118]. Характерные профили приведены на рисунке 12.

Схематизированные профили теплообменных труб нового патентного семейства

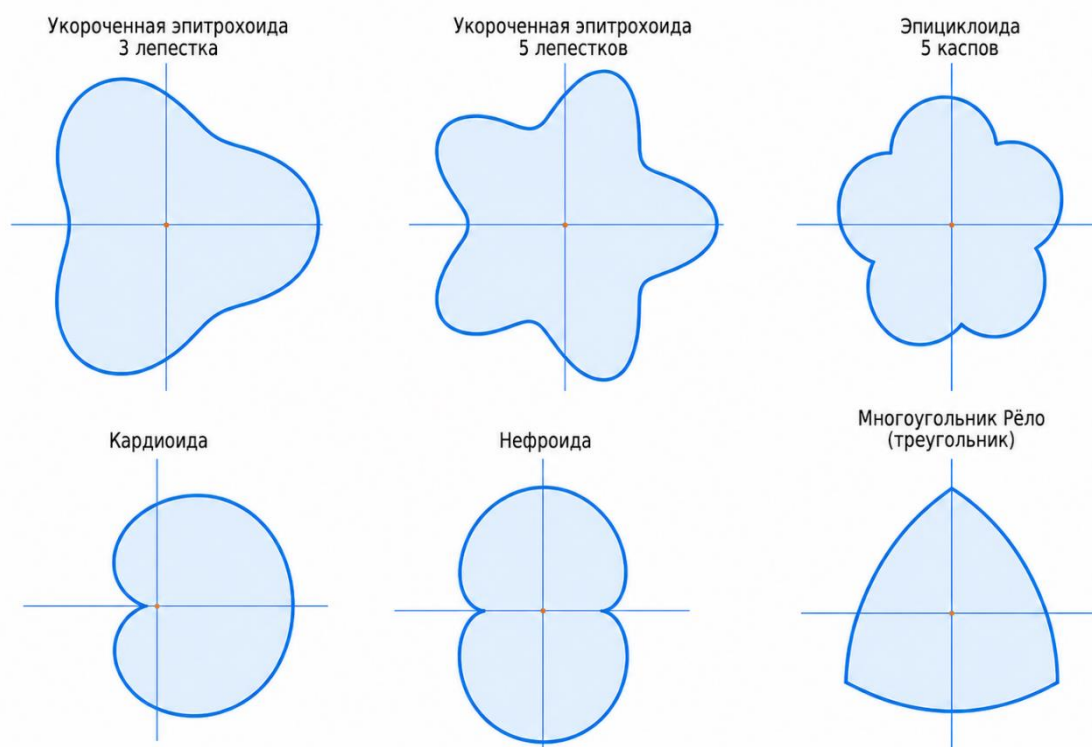


Рисунок 12 – Схематизированные поперечные сечения теплообменных труб нового патентного семейства

Рисунок 12 показывает принципиальную форму профилей; точные координаты и отношения размеров определяются рабочими поверхностями формующей оснастки. Общий технический результат состоит в увеличении периметра трубы и изменении распределения хладоносителя при неизменных внешних размерах аппарата.

Эпитрохоидальный ряд позволяет отдельно изменять число лепестков и их глубину. При небольшом числе лепестков заметнее меняется гидродинамика кольцевого канала. По мере их увеличения растет периметр, но уменьшается локальный радиус кривизны и усложняется формовка. Поэтому развитые варианты следует оценивать не только по площади, но и по остаточной толщине стенки в вершинах и способности ледяного элемента свободно выйти из трубы.

Для эпициклоидальных труб характерны каспы. Если их больше трех, периметр профиля превышает периметр круглой трубы, описанной тем же внешним габаритом. Расчетное увеличение площади составляет 1,9% для трех каспов, 6,2% для четырех, 9,2% для пяти и 11,5% для шести [119].

Многоугольники Рёло относятся к фигурам постоянной ширины: при повороте расстояние между двумя параллельными опорными линиями не меняется. Для формования труб это может облегчить сохранение заданного внешнего размера, хотя реальная технологичность определяется числом дуг и радиусами их сопряжения. Кардиоида и нефроида образуют соответственно асимметричный и двухлепестковый канал и могут направленно перераспределять поток относительно входного патрубка.

Для семейства эпициклоид получены уточненные зависимости вида $Nu = A \cdot Re^b \cdot Pr^{0,4}$ в диапазоне переходного режима течения хладоносителя [119], где Nu – критерий Нуссельта; A ,

b – эмпирические коэффициенты; Re – критерий Рейнольдса; Pg – критерий Прандтля (таблица 12).

Таблица 12 – Уточненные коэффициенты для расчета критерия Нуссельта

Сечение трубы	Коэффициент A	Коэффициент b
Круглое (типовое)	0,009	0,794
Эпициклоида, 1 касп	0,006	0,844
Эпициклоида, 2 каспа	0,001	1,022
Эпициклоида, 3 каспа	0,001	1,012
Эпициклоида, 4 каспа	0,009	0,774
Эпициклоида, 5 каспов	0,039	0,609
Эпициклоида, 6 каспов	0,010	0,747
Эпициклоида, 7 каспов	0,006	0,551
Эпициклоида, 8 каспов	0,038	0,609
Эпициклоида, 9 каспов	0,101	0,515
Эпициклоида, 10 каспов	0,297	0,401

Нелинейное изменение коэффициентов связано с тем, что профиль одновременно меняет характерный размер канала, поле скорости и гидравлическое сопротивление.

Полученные корреляции применимы для предварительного расчета только в исследованных диапазонах свойств и скоростей. Использовать их без проверки для ламинарного течения, другого хладоносителя или высоковязкого концентрата нельзя. При переходе к промышленному аппарату коэффициенты сначала уточняют на гидравлическом стенде, а затем проверяют в опытах с реальным льдообразованием.

3.8. Сопоставление конструктивных решений

Стержни и профильная труба улучшают одну и ту же исходную конструкцию разными путями. Стержневые элементы сильнее возмущают поток и в исследованном диапазоне дали лучший показатель удельной мощности. Профилирование обеспечивает меньший расчетный эффект, зато почти не увеличивает массу и не требует многочисленных соединений. Поэтому окончательный выбор зависит от серийности производства, санитарных ограничений и стоимости изготовления не меньше, чем от теплотехнического результата.

Для единичной опытной установки стержни удобны тем, что их размеры и шаг легко менять без изготовления новой трубы. Они подходят для быстрого поиска рациональной интенсивности турбулизации. Для серийного аппарата выгоднее профилирование: после разработки валков стоимость каждой следующей трубы снижается, а повторяемость геометрии повышается.

В пищевой промышленности профиль имеет дополнительное преимущество – отсутствие наружных щелей и труднодоступных участков в зоне хладоносителя. Хотя этот контур обычно замкнут и не контактирует с продуктом, его загрязнение ухудшает теплообмен

и усложняет обслуживание. Гладкая профилированная поверхность легче промывается и контролируется эндоскопом.

Для внутренней продуктовой поверхности критична шероховатость после формовки. Микрорельеф может способствовать образованию льда, но одновременно повышать адгезию и удерживание концентрата. Поэтому профилирование должно сопровождаться чистовой обработкой, обеспечивающей санитарную чистоту и воспроизводимое отделение льда.

При сравнении вариантов следует учитывать и режим оттаивания. Развитый профиль увеличивает площадь контакта льда со стенкой, поэтому суммарная энергия, необходимая для ослабления адгезии, может возрастать. Однако благодаря тонкому пограничному слою и большей площади теплопередачи требуемая длительность импульса не обязательно увеличивается. Экспериментальная проверка должна определять минимальную температуру и время подачи теплоносителя, при которых лед отделяется целиком, но не происходит значительного плавления.

Механическая прочность профильной трубы оценивается по наиболее тонкому и криволинейному участку. Для внутреннего намораживания давление продукта невелико, но при оттаивании возможны локальные нагрузки. Кроме статического расчета необходимы циклические испытания на многократное охлаждение и нагрев, поскольку рабочий ресурс определяется усталостью в зонах максимальной деформации.

В результате профилированная конструкция является базовым вариантом для санитарных и серийных установок, а стержневая – вариантом гидродинамической интенсификации. Комбинация обоих решений также возможна.

3.9. Комплексная сравнительная оценка

Для исключения одностороннего выбора разработана методика комплексной оценки [119]. Типовой круглой конструкции по каждому из удельных показателей присваивается значение 1,00. Для показателей, увеличение которых является положительным, оценка нового варианта равна отношению его значения к соответствующему значению типовой конструкции.

Сумма оценок образует интегральный балл. Типовая конструкция имеет постоянный балл. Значение итоговой оценки выше означает, что конструкция в рассматриваемом режиме превосходит типовую по совокупности критериев; значение ниже указывает, что прирост отдельных характеристик не компенсирует массу, габариты или гидравлические потери.

Преимущество такой методики – прозрачность. В отличие от единого экономического показателя, она не требует заранее задавать стоимость электроэнергии и материалов, которые зависят от региона и масштаба производства. При необходимости каждому частному критерию можно назначить вес: например, для мобильной установки повысить значимость массы и габаритов, а для стационарной водоподготовки – энергозатрат и производительности.

Результаты моделирования показали, что конструкции с эпициклоидой, имеющей 9 и 10 каспов, рациональны во всем диапазоне переходного режима течения хладоносителя. Конструкция с тремя каспами имеет локальный диапазон преимущества при $Re = 7500\text{--}8500$ [119]. Остальные варианты могут быть полезны при иных габаритах или свойствах среды, но в рассмотренной модели не обеспечили устойчивого превосходства над типовой трубой.

Комплексная оценка также позволяет выявить причину проигрыша конкретного профиля. Если балл снижается из-за удельной мощности, следует уменьшить глубину

профиля или изменить патрубки. Если ограничивающей является удельная материалоемкость, требуется оптимизация толщины стенки и длины рабочей зоны.

В дальнейшей работе методика может быть дополнена показателями качества разделения: массовой долей растворенных веществ во льду, выходом концентрата, расходом промывочной воды и временем санитарной обработки. Тогда конструктивная оценка станет технологической и позволит напрямую выбирать аппарат для сока, сыворотки, солевого раствора или технологической воды.

3.10. Конструктивная реализация опытно-промышленного аппарата

Опытно-промышленный кристаллизатор рекомендуется выполнять модульным. Каждый модуль включает коллектор профилированных труб, нижние герметизирующие крышки, поворотный стол, общий кожух хладоносителя и приемник продукта. Коллекторы первой и второй ступеней размещаются так, чтобы трубные элементы были доступны для визуального контроля и замены без демонтажа холодильного контура.

Материал деталей, контактирующих с продуктом, выбирается по коррозионной стойкости, свариваемости и санитарным требованиям. Для пищевых сред базовым вариантом является сталь марки 08Х18Н10Т или сопоставимая аустенитная сталь. Эластомер крышек должен сохранять упругость при отрицательных температурах, выдерживать моющие растворы и не передавать продукту посторонние компоненты.

Патрубки хладоносителя следует располагать так, чтобы поток равномерно распределялся по длине и периметру труб. При большом числе параллельных элементов необходимы распределительные коллекторы с балансировочными отверстиями или регулирующими вставками. Неравномерность расхода между трубами приводит к разной толщине льда и нарушению синхронной разгрузки.

Система измерений должна включать температуры на входе и выходе обеих ступеней, температуру продукта, расход и перепад давления хладоносителя, уровень в баках, положение поворотных столов и состояние крышек. Для растворов с электролитами полезен датчик электропроводности; для соков и молочной сыворотки – рефрактометрический или плотностной датчик. Эти сигналы позволяют оценивать материальный баланс и завершать цикл по концентрации, а не только по времени.

Насос хладоносителя и компрессор целесообразно оснащать частотным регулированием. На начальном участке цикла допустим повышенный расход для быстрого отвода чувствительной теплоты. По мере роста льда расход уменьшают до уровня, при котором прирост коэффициента теплоотдачи еще компенсирует затраты на перекачивание. Для второй ступени алгоритм учитывает более низкую криоскопическую температуру и повышенную вязкость полуконцентрата.

Оттаивание должно быть импульсным. Цель – прогреть тонкий контактный слой между льдом и металлом, а не расплавить весь лед. Температура теплоносителя, длительность импульса и момент открытия крышек подбираются экспериментально. Одновременное открытие до ослабления адгезии создает высокую нагрузку на уплотнение; чрезмерный прогрев повышает расход энергии и разбавляет промывочную воду.

Промывка льда проводится в отдельном приемнике. Форсунки размещаются так, чтобы струя удаляла поверхностную пленку концентрата, но не разделяла лед на мелкие частицы. Вода после промывки фильтруется; при концентрации растворенных веществ выше

допустимой она возвращается в продуктовый контур, а более чистая фракция используется для предварительного охлаждения.

Санитарная обработка предусматривает полный дренаж всех продуктовых объемов. Внутренние поверхности труб, промежуточные баки и трубопроводы не должны иметь тупиковых участков. Для безразборной мойки поворотные столы фиксируются в рабочем положении, крышки открываются по программе, а моющий раствор последовательно проходит обе ступени и контур возврата промывочной воды.

При масштабировании предпочтительно сохранять геометрию отдельной трубы и увеличивать число параллельных модулей. Такой подход сохраняет проверенные корреляции, упрощает резервирование и дает возможность ступенчато регулировать производительность отключением отдельных секций. Увеличение диаметра одной трубы требует повторного исследования динамики льда и механизма разгрузки.

3.11. Выбор конструкции для различных технологических задач

Для низковязких чистых растворов и опреснения воды приоритетны профили с высокой комплексной оценкой – эпициклоиды с 9–10 каспами. В этих условиях гидравлическое сопротивление предсказуемо, а развитая поверхность повышает производительность. Для солевых растворов дополнительно контролируются коррозия, отложение солей в зоне оттаивания и чистота промывочной воды.

Для соков, молочной сыворотки и экстрактов с повышенной вязкостью целесообразны более мягкие профили – 3–6 лепестков или каспов. Чрезмерно развитая геометрия может создавать локальные зоны удерживания мякоти и белка. Двухступенчатая схема здесь особенно полезна: первая ступень работает при большей доле свободной воды, вторая – при пониженной температуре и меньшем расходе продукта.

Для сред, требующих строгой санитарной обработки, профилированная труба предпочтительнее приварных наружных интенсификаторов. Для химических растворов, не предъявляющих пищевых требований, стержневая интенсификация может быть оправдана при высокой тепловой нагрузке и ограниченном габарите. При этом стержни из двух треугольников Рёло обеспечивают наилучшую удельную мощность среди исследованных конструкций [122].

Для установок переменной производительности рационален модульный аппарат с частотным регулированием и возможностью отключения секций. Для непрерывных линий важна буферная емкость между ступенями, компенсирующая различие длительности циклов. Для периодического производства небольших партий достаточно одного комплекта труб с последовательным использованием двух температурных режимов, но выигрыш по времени будет меньше, чем при параллельной работе ступеней.

Окончательный выбор выполняется после опытов на целевой жидкости. Программа испытаний должна включать определение зависимости толщины льда от времени, содержания растворенных веществ во льду, удельных энергозатрат, длительности оттаивания и качества мойки. Для пищевых продуктов дополнительно оцениваются цвет, аромат, белковый состав и микробиологическая стабильность.

Экономическая оценка проводится для полного цикла. Профиль с максимальной поверхностью может иметь более дорогую оснастку, но меньший расход электроэнергии и меньшее число труб. Стержневой аппарат может быть дешевле на опытной стадии, но дороже в серийном изготовлении и обслуживании. Двухступенчатая схема требует большего числа

узлов, однако сокращает время цикла и возвращает холод талой воды. Поэтому оптимум определяется сроком эксплуатации и годовой загрузкой.

Разработанное семейство конструкций позволяет переходить от единичного аппарата к платформе оборудования. Общие корпусные элементы, баки, приводы и система управления сочетаются с различными трубными профилями. Это сокращает объем повторного проектирования и дает возможность адаптировать кристаллизатор к новой среде заменой рабочего модуля, а не всей установки.

3.12. Выводы по главе 3

Разработана концепция модульного двухступенчатого емкостного криоконцентратора, сочетающего последовательное снижение криоскопической температуры, предварительное охлаждение сырья и возврат холода талой воды.

Разбиение процесса на две ступени уменьшает требуемую толщину ледяного слоя в каждой ступени. Для рассмотренного расчетного режима продолжительность формирования необходимого количества льда сокращается более чем втрое по сравнению с одноступенчатой схемой.

Экспериментальные и расчетные данные подтверждают квадратно-корневой характер роста льда. Оптимальная толщина не является постоянной и должна определяться для конкретной геометрии, хладоносителя, продукта и структуры цикла.

Стержневые интенсификаторы обеспечивают выраженное выравнивание поля скоростей. Наилучший энергетический показатель получен для стержня из двух треугольников Рёло, а наилучший массовый показатель – для круглого стержня.

Профилирование теплообменной трубы дает меньший локальный прирост показателей, но сохраняет технологичность конструкции. Это предпочтительное направление для серийных пищевых кристаллизаторов.

Сформировано патентное семейство профилей: эпитрохоиды, эпициклоиды и многоугольники Рёло. Для эпициклоид с 9 и 10 каспами подтверждено устойчивое преимущество по комплексу показателей в диапазоне переходного режима течения хладоносителя в межтрубном пространстве кристаллизатора.

Предложенная методика сравнительной оценки объединяет материалоемкость, компактность, тепловую мощность, производительность конструкции и затраты на перекачивание рабочих сред. Перед промышленным внедрением результаты вычислительного моделирования должны подтверждаться гидравлическими, тепловыми и технологическими испытаниями на целевых продуктах.

Заключение

В монографии рассмотрена технология кристаллизационного разделения жидких сред как комплексный низкотемпературный процесс, результат которого определяется не только образованием твердой фазы, но и качеством последующего отделения льда, работой холодильной системы, организацией потоков продукта и хладоносителя, а также режимом управления. Проведенный анализ позволил объединить сведения о современном оборудовании, направлениях его совершенствования и новых конструктивных решениях в единую систему инженерных принципов.

Основные результаты и выводы работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Разделительное вымораживание является перспективным способом концентрирования, очистки и опреснения водных растворов. Его технологическое преимущество наиболее полно проявляется при обработке термолабильных продуктов, когда требуется сохранить природный состав и биологически активные компоненты, а также при получении очищенной воды как самостоятельного полезного продукта.

2. Эффективность процесса определяется согласованием кристаллизации и сепарирования. Увеличение температурного напора ускоряет образование льда, однако при чрезмерной интенсивности возрастает захват маточного раствора и ухудшается чистота кристаллической фазы. Поэтому производительность кристаллизатора должна оцениваться совместно с потерями сухих веществ, степенью концентрирования и качеством получаемых продуктов.

3. Рост ледяного слоя создает изменяющееся во времени термическое сопротивление. Скорость намораживания имеет нелинейный, близкий к квадратно-корневому характер, а удельные энергетические затраты после достижения определенной толщины начинают возрастать. Рациональная толщина льда не является универсальной величиной и должна определяться для конкретной геометрии, температуры хладоносителя, состава продукта и структуры технологического цикла.

4. Существующие емкостные, барабанные, скребковые, суспензионные и каскадные кристаллизаторы обладают различными сочетаниями простоты конструкции, непрерывности, производительности и селективности процесса. Емкостные аппараты удобны для периодической обработки и лабораторных исследований; барабанные и скребковые конструкции обеспечивают непрерывное снятие тонкого льда; суспензионные кристаллизаторы предъявляют повышенные требования к сепарации; многоступенчатые установки позволяют учитывать последовательное снижение криоскопической температуры концентрата.

5. Кристаллизатор необходимо рассматривать как часть энерготехнологической системы. Энергетический результат зависит от работы компрессора, насосов и приводов, потерь в теплообменниках и регулирующих устройствах, теплопритоков из окружающей среды и затрат на оттаивание льда. Наиболее значимыми направлениями повышения эффективности являются рекуперация теплоты конденсации, использование холода отделенного льда, реверсивная работа модулей и частотное регулирование производительности холодильной машины и циркуляционных насосов.

6. Совершенствование поверхности теплообмена должно проводиться по многокритериальному принципу. Стержневые интенсификаторы, перегородки и профильные

трубы способны увеличить площадь контакта и выровнять поле скоростей хладоносителя, но одновременно могут повышать массу, гидравлическое сопротивление и сложность санитарной обработки конструкции. Рациональным является решение, обеспечивающее приrost тепловой мощности при приемлемых затратах на изготовление и циркуляцию рабочих сред.

7. Разработанная двухступенчатая емкостная схема сочетает последовательное концентрирование, предварительное охлаждение исходной жидкости и возврат холода талой воды. Разделение общей нагрузки между двумя ступенями уменьшает требуемую толщину льда на каждой поверхности и позволяет сократить продолжительность процесса. Для рассмотренного расчетного режима продолжительность формирования требуемого количества льда снизилась более чем втрое по сравнению с одноступенчатым вариантом.

8. Вычислительное моделирование показало, что стержневые интенсификаторы способны существенно повысить равномерность движения хладоносителя. Наилучший энергетический показатель среди рассмотренных вариантов получен для стержня, образованного двумя треугольниками Рёло, тогда как минимальная добавочная материалоемкость характерна для круглого стержня. Это подтверждает необходимость выбора формы интенсификатора с учетом приоритетного критерия конкретной установки.

9. Профилирование теплообменной трубы обеспечивает увеличение поверхности при сохранении технологичности аппарата. Сформированное семейство конструкций включает эпитрохоидальные, эпициклоидальные, профили и многоугольники Рёло. По результатам комплексной расчетной оценки устойчивое преимущество в исследованном диапазоне режимов продемонстрировали эпициклоидальные профили с девятью и десятью каспами. Перед серийным применением эти результаты должны быть подтверждены стендовыми тепловыми, гидравлическими и технологическими испытаниями.

10. Предложенная система удельных показателей позволяет сопоставлять типовые и новые конструкции по материалоемкости, компактности, тепловой мощности, производительности и мощности, затрачиваемой на циркуляцию хладоносителя. Такая оценка снижает риск локальной оптимизации, при которой улучшение одного параметра сопровождается ухудшением других характеристик, важных для промышленной эксплуатации.

11. Перспективный промышленный кристаллизатор должен иметь модульную компоновку, полностью дренируемые контуры, возможность безразборной мойки, надежный механизм отвода льда и концентрата, а также систему измерения температуры, расхода, концентрации рабочих сред и потребляемой мощности. Алгоритм управления должен изменять режим по мере роста льда и повышения концентрации продукта, а не поддерживать единственную постоянную температуру в течение всего цикла.

12. Выбор конструкции должен учитывать свойства разделяемой среды. Для соков и растительных экстрактов приоритетны мягкие режимы и минимизация потерь ароматических веществ; для молока и сыворотки – санитарная доступность и предотвращение белковых отложений; для рассолов и опреснения воды – коррозионная стойкость и чистота льда; для химических и биотехнологических растворов – совместимость материалов, герметичность и возможность работы с осадками и многокомпонентными системами.

Дальнейшее развитие технологии целесообразно связывать с экспериментальной проверкой новых профилей и интенсификаторов на реальных продуктах, исследованием включения растворенных веществ в лед, совершенствованием промывки и частичного плавления кристаллов, созданием цифровых моделей с подвижной границей фазового перехода и разработкой модульных опытно-промышленных установок. Отдельной задачей

является комплексная технико-экономическая оценка, учитывающая капитальные затраты, энергопотребление, санитарную обработку, а также стоимость утилизации или возврата побочных потоков.

Полученные результаты показывают, что перспективы технологии кристаллизации связаны не с предельным увеличением интенсивности одного процесса, а с согласованием теплопередачи, гидродинамики, сепарирования, энергетики и управления. Реализация такого системного подхода создает основу для разработки кристаллизаторов нового поколения, способных обеспечивать высокое качество разделения при рациональном использовании энергии и материалов.

Список литературы

1. Короткий, И.А. Исследование работы емкостного кристаллизатора для разделительного вымораживания жидких пищевых продуктов / И.А. Короткий, Д.Е. Федоров, Н.А. Тризно // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – № 4(27). – С. 106-110.
2. Исследование процесса циклического концентрирования вишневого сока вымораживанием / В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец, А.Н. Денежная // Вестник Международной академии холода. – 2015. – № 1. – С. 4-8.
3. Гуцин, А.А. Анализ процессов криоконцентрирования молочной сыворотки в нескольких последовательных ступенях / А.А. Гуцин // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – № 2(45). – С. 87-92.
4. Шамаров, М.В. Низкотемпературное концентрирование / М.В. Шамаров, М.И. Лугинин // Пищевая индустрия. – 2011. – № 4/9. – С. 65-66.
5. Шульга, Н.Н. Криоконцентрирование сыворотки крови / Н.Н. Шульга // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2009. – № 5. – С. 47-49.
6. Эксергетический анализ концентрирующей вымораживающей установки / С.Т. Антипов, В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, А.А. Корчинский // Вестник Международной академии холода. – 2017. – № 2. – С. 78-83. – DOI 10.21047/1606-4313-2017-16-2-78-83.
7. Термодинамические особенности процесса концентрирования жидких сред вымораживанием / С.Т. Антипов, В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 159.
8. Короткий, И.А. Эффективность производства искусственного холода разделительных вымораживающих установках / И.А. Короткий, Е.В. Короткая, М.Г. Курбанова // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – № 4(43). – С. 116-122.
9. Математическая модель процесса намораживания льда на сферической поверхности применительно для аккумуляторов холода / И.Е. Лобанов, Б.С. Бабакин, Р.Б. Айтикеев [и др.] // Вестник Международной академии холода. – 2013. – № 4. – С. 12-15.
10. Разработка модели анализа и прогноза основных характеристик процесса криоконцентрирования / С.Т. Антипов, В.Ю. Овсянников, А.Н. Рязанов, С.М. Яценко // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – № 4. – С. 36–38.
11. Моделирование процесса генерации льда и инея на поверхности воздухоохладителя / Е.В. Семенов, Б.С. Бабакин, М.И. Воронин, М. Ласаро // Вестник Международной академии холода. – 2009. – № 4. – С. 5–9.
12. Белозеров, Г.А. Математическое моделирование продолжительности процесса замораживания и плавления эвтектического раствора в аккумуляторах холода / Г.А. Белозеров, Б.С. Бабакин, Б.А. Макаров // Известия КГТУ. – 2011. – № 23. – С. 141-147.
13. Hosseini, S.R. On the role of surface morphology in impacting-freezing dynamics of supercooled droplets / S.R. Hosseini, M. Moghimi, N.M. Nouri // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 12585. – DOI 10.1038/s41598-024-61826-5.

14. Калнинь, И.М. Вакуумно-испарительные холодильные системы / И.М. Калнинь, Б.Т. Маринюк, К.С. Крысанов // Вестник Международной академии холода. – 2013. – № 1. – С. 34-38.
15. Конвективное и вакуумно-испарительное охлаждение пищевых продуктов / Н.Н. Малихов, Н.Б. Горбачев, Т.В. Галаган, С.И. Меркушев // Известия вузов. Пищевая технология. – 2003. – № 1. – С. 89–90.
16. Овсянников, В.Ю. Концентрирование яблочного сока в барабанной вымораживающей установке / В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2014. – № 4. – С. 41-44.
17. Патент № 2221202 С1 Российская Федерация, МПК F25C 1/14, F25C 1/00. Кристаллизатор для непрерывного вымораживания и получения чешуйчатого льда: № 2002129080/12: заявл. 30.10.2002: опубл. 10.01.2004 / С.Т. Антипов, В.Ю. Овсянников, А.Н. Рязанов; заявитель Государственное образовательное учреждение Воронежская государственная технологическая академия.
18. Шабдаров, Н.М. Модернизация льдогенератора / Н.М. Шабдаров, Р.А. Милютин // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2021. – № 12-3(63). – С. 119-121. – DOI 10.24412/2500-1000-2021-12-3-119-121.
19. Управление процессом низкотемпературного концентрирования жидких сред вымораживанием / В.Ю. Овсянников, Н.И. Бостынец, А.Н. Денежная, Я.И. Кондратьева // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 2. – С. 10-13.
20. Патент № 2743796 С1 Российская Федерация, МПК A23C 1/06, A23L 3/00, F25C 1/12. Криоконцентратор пищевых жидких сред карусельного типа: № 2020100760: заявл. 09.01.2020: опубл. 26.02.2021 / И.А. Короткий, И.Б. Плотников, Л.В. Плотникова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кемеровский государственный университет".
21. Аналитический обзор способов регулирования производительности винтовых компрессоров / В.А. Пронин, В.А. Цветков, А.В. Кованов [и др.] // Вестник Международной академии холода. – 2021. – № 2. – С. 28–38.
22. Технические решения по вторичному использованию тепловой энергии и повышению экологической эффективности инженерных систем / Е.Н. Неверов, И.А. Короткий, П.С. Коротких [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – Т. 49, № 4. – С. 26-34. – DOI 10.21822/2073-6185-2022-49-4-26-34.
23. Овсянников, В.Ю. Определение режимов концентрирования яблочного сока вымораживанием / В.Ю. Овсянников // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 7. – С. 16-18.
24. Антипов, С.Т. Кинетика процесса концентрирования вымораживанием вишневого сока / С.Т. Антипов, В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2014. – № 4(62). – С. 44-48.

25. Короткий, И.А. Исследование процессов криоконцентрирования молочной сыворотки / И.А. Короткий, П.А. Гунько, Д.Е. Федоров // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 1(88). – С. 148-153.
26. Короткий, И.А. Разделительное вымораживание при переработке обезжиренного молока / И.А. Короткий, Е.В. Короткая, О.М. Мальцева // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 10(109). – С. 115-121.
27. Короткий, И.А. Исследование процессов выделения белков и лактозы из молочной сыворотки / И.А. Короткий, П.А. Гунько, Т.З. Валиахмедов // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – № 1(32). – С. 44-48.
28. Гущин, А. А. Концентрирование творожной сыворотки разделительным вымораживанием / А.А. Гущин // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 10(133). – С. 168-174.
29. Короткая, Е.В. Особенности очистки воды разделительным вымораживанием для производства восстановленного молока / Е.В. Короткая, И.А. Короткий, А.В. Учайкин // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – Т. 48, № 3. – С. 133-139. – DOI 10.21603/2074-9414-2018-3-133-139.
30. Панченко, С.Л. Исследование процесса замораживания вторичного сырья предприятий пищевой промышленности / С.Л. Панченко, С.М. Яценко // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2021. – № 2. – С. 176-185. – DOI 10.36107/spfp.2021.217.
31. Мальцева, О.М. Моделирование процесса намораживания льда на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора / О.М. Мальцева // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – № 3(42). – С. 118-124.
32. Многофункциональное оборудование для низкотемпературного разделения пищевых растворов на основе эффекта "термического парадокса" / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, В.П. Мордынский [и др.] // Проблемы региональной энергетики. – 2022. – № 1(53). – С. 42-58. – DOI 10.52254/1857-0070.2022.1-53.04.
33. Патент № 2569021 С1 Российская Федерация, МПК F25C 1/08. Устройство для концентрирования жидких сред вымораживанием и получения льда: № 2014132681/13: заявл. 07.08.2014; опубл. 20.11.2015 / С.Т. Антипов, В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Воронежский государственный университет инженерных технологий (ФГБОУ ВПО ВГУИТ).
34. Разработка мехатронного модуля узла криоконцентратора карусельного типа для обеспечения промышленной безопасности при создании новых продуктов глубокой переработки / И.Б. Плотников, И.А. Короткий, Е.Н. Неверов [и др.] // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1(69). – С. 118-125. – DOI 10.31563/1684-7628-2024-69-1-118-125.
35. Патент № 2816844 С1 Российская Федерация, МПК B01D 17/02, C11B 9/02. Устройство для разделения эфирно-масличных дистиллятов: № 2023122293: заявл. 28.08.2023; опубл. 05.04.2024 / А.Х.Х. Нугманов, И.А. Бакин, Е.Л. Маланкина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева".

36. Increasing Efficiency of Shell-and-Tube Heat Exchanger Taking Account of Energy Consumption Reduction / M.G. Lagutkin, E.Y. Baranova, D.I. Mishachkin, V.N. Naumov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2022. – Vol. 57, No. 9-10. – P. 713-719. – DOI 10.1007/s10556-022-00997-2.
37. Effect of elliptical dimples on heat transfer performance in a shell and tube heat exchanger / S.A.A. Mehrjardi, A. Khademi, Z. Said [et al.] // Heat and Mass Transfer. – 2023. – Vol. 59, No. 10. – P. 1781-1791. – DOI 10.1007/s00231-023-03367-7.
38. A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers / S.A. Marzouk, M.M. Abou Al-Sood, E.M.S. El-Said [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2023. – Vol. 148, No. 15. – P. 7539-7578. – DOI 10.1007/s10973-023-12265-3.
39. Numerical investigation of tubeside maldistribution in shell-and-tube heat exchangers / R. Schab, A. Kutschabsky, S. Unz, M. Beckmann // Heat and Mass Transfer. – 2023. – DOI 10.1007/s00231-023-03385-5.
40. Al-Zahrani, S. Heat transfer characteristics of innovative configurations of double pipe heat exchanger / S. Al-Zahrani // Heat and Mass Transfer. – 2023. – Vol. 59, No. 9. – P. 1661-1675. – DOI 10.1007/s00231-023-03360-0.
41. Sensitivity Analysis and Design Optimization of Nanofluid Heat Transfer in a Shell-and-Tube Heat Exchanger for Solar Thermal Energy Systems: A Statistical Approach / W.F. Alfwzan, G.A. Alomani, L.A. Alessa, M.M. Selim // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – DOI 10.1007/s13369-023-08568-0.
42. Enhancement of heat transfer rate with structural modification of double pipe heat exchanger by changing cylindrical form of tubes into conical form / M. Hashemian, S. Jafarmadar, J. Nasiri, H. Sadighi Dizaji // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 118. – P. 408-417. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2017.02.095.
43. Bai, Y. Design and Analysis of Heat Pipe Heat Exchanger Efficiency / Y. Bai, Yi. Yao, Sh. Zheng // Bulletin of Science and Practice. – 2023. – Vol. 9, No. 6. – P. 373-380. – DOI 10.33619/2414-2948/91/44.
44. Hussein, H. Numerical and experimental investigation of the thermal performance of the double pipe-heat exchanger / H. Hussein, B. Freegah // Heat and Mass Transfer. – 2023. – Vol. 59, No. 12. – P. 2323-2341. – DOI 10.1007/s00231-023-03414-3.
45. Mohsen, O.A. Heat Transfer Enhancement in a Double Pipe Heat Exchanger Using Different Fin Geometries in Turbulent Flow / O.A. Mohsen, M.A. R. Muhammed, B.O. Hasan // Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 45, No. 2. – P. 461-471. – DOI 10.1007/s40997-020-00377-2.
46. Thermal performance enhancement in heat exchangers using active and passive techniques: a detailed review / S. Bhattacharyya, D.K. Vishwakarma, A. Srinivasan [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2022. – DOI 10.1007/s10973-021-11168-5.
47. The hydrothermal performance enhancement techniques of corrugated channels: a review / M.A. Alfellag, H.E. Ahmed, M.G. Jehad, A.A. Farhan // Journal of Thermal Analysis and

- Calorimetry. – 2022. – Vol. 147, No. 19. – P. 10177-10206. – DOI 10.1007/s10973-022-11247-1.
48. Исследование процессов тепломассообмена при пленочном обтекании ледовых поверхностей с фазовым переходом на границе раздела / Г.Ю. Гончарова, В.П. Пытченко, С.С. Борзов, Г.В. Борщев // Вестник Международной академии холода. – 2021. – № 4. – С. 3-11. – DOI 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11.
49. Ugolnikova, M.A. Dynamics of Water Ice Formation during the Operation of Vessel Cryoconcentrators / M.A. Ugolnikova, V.V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 57, No. 7-8. – P. 561-566. – DOI 10.1007/s10556-021-00976-z.
50. Influence of the Height of Surface Microroughness on the Wettability of Polymer-Packed Devices / A.V. Stepykin, N.S. Goryunov, L.A. Malygin [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – Vol. 59, No. 1-2. – P. 86-92. – DOI 10.1007/s10556-023-01211-7.
51. Influence of the Surface Structure on the Wettability of Polymer Packing Elements in Heat- and Mass-Transfer Equipment / P.D. Vasiliev, A.A. Sidiyagin, A.V. Stepykin [et al.] // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 56, No. 2. – P. 212-220. – DOI 10.1134/S0040579522020166.
52. Патент № RU 2131095 C1 Российская Федерация, МПК F25C 1/14. Устройство для криоконцентрирования жидких и пастообразных пищевых продуктов: № 98110553/13: заявл. 04.06.1998: опубл. 20.05.1999 / Д.В. Шляховецкий, В.М. Шляховецкий; заявитель и правообладатель Краснодарский научно-исследовательский институт хранения и переработки сельскохозяйственной продукции.
53. Патент на полезную модель № 219187 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. емкостной криоконцентратор: № 2023108199: заявл. 02.04.2023: опубл. 04.07.2023 / М.А. Угольникова, В.Б. Сапожников, В.Чернявская, И.Ю. Голованов.
54. Евразийская заявка на изобретение № 201101710 A1, МПК C02F 1/22. Устройство для очистки воды: № 201101710: приоритет 09.12.2011: заявл. 09.12.2011: опубл. 30.01.2013 / С.А. Бучик.
55. Патент № KR 102612608 B1 Республика Корея, МПК B01D 9/04, C02F 1/22, F25B 1/00, F25B 40/04. Система очистки воды методом перекристаллизации и теплообменные устройства для системы очистки воды методом перекристаллизации: № KR1020217024151A: приоритет 29.12.2018: заявл. 26.12.2019: опубл. 12.12.2023 / Д.Д. Блинов, Е.Ю. Муринский.
56. Патент № 2654867 C1 Российская Федерация, МПК A23L 3/00. Устройство для разделительного вымораживания жидких пищевых продуктов: № 2016147301: заявл. 01.12.2016: опубл. 23.05.2018 / И.А. Короткий, Д.Е. Федоров, А.А. Гушин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кемеровский государственный университет" (КемГУ).
57. Патент на полезную модель № RU 198654 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/02 Трубный кристаллизатор: № 2020114518: заявл. 23.04.2020: опубл. 21.07.2020 / А.Б. Голованчиков, О.А. Залипаева, С.С. Родин [и др.]; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолгГТУ).

58. Патент на полезную модель № RU192489U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/02, C10G 73/02 Трубный кристаллизатор: № 2019112943: заявл. 26.04.2019: опубл. 18.09.2019 / А.Б. Голованчиков, Ю.Л. Зотов С.С. Родин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолГТУ).
59. Патент № GB 1227678 A Великобритания, МПК F26B 5/06, B01D 9/04. Установка для сушки: № 43095/69: заявл. 29.08.1969: опубл. 07.04.1971 / New Brunswick Scientific Co., Inc.
60. Международная патентная публикация № WO 2012/001706 A2, МПК C02F 1/22, B01D 7/02, F25B 1/10, F25B 29/00. Система криоконцентрирования с трубчатыми теплообменными аппаратами: № PCT/IN2011/000430: заявл. 28.06.2011: опубл. 05.01.2012 / М.В. Ране, Й.С. Падия.
61. Патент № GB 1056075 A Великобритания, МПК F28D 7/10, F28F 1/10, F28F 1/36. Усовершенствования теплообменных аппаратов: № 27588/63: заявл. 11.07.1963: опубл. 25.01.1967 / Escher Wyss AG.
62. Патент № 2035683 C1 Российская Федерация, МПК F28D 7/10. Теплообменник типа "труба в трубе": № 4950342/06: заявл. 27.06.1991: опубл. 20.05.1995 / В.В. Привалов, В.П. Ядров; заявитель Сумской государственный университет.
63. Патент № 2359192 C1 Российская Федерация, МПК F28D 7/10. Теплообменник типа "труба в трубе": № 2008111744/06: заявл. 27.03.2008: опубл. 20.06.2009 / Г.Я. Ахмедов; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Дагестанский государственный технический университет" (ДГТУ).
64. Патент № CN 201165960 Y Китайская Народная Республика, МПК F04B 39/06, F04C 29/04. Разборный межступенчатый охладитель компрессора природного газа: № 200820062586.4: заявл. 18.03.2008: опубл. 17.12.2008 / Жань Маоцунь, Чэнь Цзянь, Чэнь Юнхуа.
65. Патент на полезную модель № 185391 U1 Российская Федерация, МПК F28D 7/00, F28F 1/38. кожухотрубный теплообменный аппарат: № 2018123055: заявл. 25.06.2018: опубл. 04.12.2018 / Л.А. Кушев, Н.Ю. Никулин, В.Г. Шаптала [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова".
66. Патент № 2697213 C1 Российская Федерация, МПК F28D 7/16, F28F 9/02. Вертикальный кожухотрубчатый теплообменник: № 2018138913: заявл. 06.11.2018: опубл. 13.08.2019 / А.Г. Шершевский, В.А. Болитэр, Ю.Р. Султанов, И.Е. Штырляев.
67. Патент № US 2009/0126918 A1 Соединённые Штаты Америки, МПК F28D 7/16, F28F 13/00, F28F 21/02. Теплообменный аппарат с использованием графитовой пены: № 11/896396: заявл. 31.08.2007: опубл. 21.05.2009 / М.Дж. Кампанья, Дж.Дж. Каллас.
68. Патент № 2042910 C1 Российская Федерация, МПК F28D 7/10. Теплообменник типа "труба в трубе" Ишкова: № 4937905/06: заявл. 16.04.1991: опубл. 27.08.1995 / Б.А. Ишков.

69. Патент № CN 101566437 А Китайская Народная Республика, МПК F28D 7/10, F28D 7/02. Композитный двухспиральный теплообменный аппарат типа «труба в трубе»: № 200810095636.3: заявл. 26.04.2008: опубл. 28.10.2009 / Чжао Вэньгэ.
70. Авторское свидетельство № 1218285 А1 СССР, МПК F28F 1/06, F28F 1/42. Теплообменная труба: № 3787482: заявл. 25.05.1984: опубл. 15.03.1986 / А.В. Русаков; заявитель Войсковая часть 11284.
71. Патент № 3612002 А Соединённые Штаты Америки, МПК F28D 7/10. Аппарат для нагрева жидкости: № 876706: заявл. 14.11.1969: опубл. 12.10.1971 / Т. Марджиттай.
72. Патент № CN106540764А Китайская Народная Республика, МПК B01L 7/00, F28D 7/10. Конденсационная трубка для вязкоупругой жидкости: № 201610905165.2: заявл. 17.10.2016: опубл. 29.03.2017 / Мао Лимэн, Цзя Чжэньюй, У Лепин.
73. Патент № 2645861 С1 Российская Федерация, МПК F28D 7/10, F28D 11/04, F28F 5/00. Теплообменник типа "труба в трубе" с вращающейся трубой: № 2017114712: заявл. 26.04.2017: опубл. 28.02.2018 / А.В. Бальчугов, Б.О. Кустов, А.В. Бадеников [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ангарский государственный технический университет".
74. Патент № 2705711 С1 Российская Федерация, МПК F28D 7/10, F28D 11/04, F28F 13/12. Теплообменник типа "труба в трубе" с вращающейся спиральной лентой: № 2019121465: заявл. 05.07.2019: опубл. 11.11.2019 / А.В. Бальчугов, Б.О. Кустов, А.В. Бадеников; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ангарский государственный технический университет".
75. Патент на полезную модель № 135101 U1 Российская Федерация, МПК F28D 7/10. Теплообменник типа "труба в трубе": № 2013128721/06: заявл. 24.06.2013: опубл. 27.11.2013 / Е.В. Романова, А.Н. Колиух; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тамбовский государственный технический университет" ФГБОУ ВПО ТГТУ.
76. Патент на полезную модель № 158070 U1 Российская Федерация, МПК F28F 1/14, F28D 1/053. скоростной теплообменный аппарат: № 2015110302/06: заявл. 23.03.2015: опубл. 20.12.2015 / Л.А. Куцев, Н.Ю. Никулин, В.А. Уваров [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова".
77. Патент на полезную модель № 226381 U1 Российская Федерация, МПК F28D 7/10. Теплообменный аппарат типа "труба в трубе": № 2024109431: заявл. 08.04.2024: опубл. 31.05.2024 / К.О. Занина, М.Г. Лагуткин, И.Ю. Голованов.
78. Патент на полезную модель № 227391 U1 Российская Федерация, МПК F28D 7/10, F28F 1/12. Теплообменный аппарат типа "труба в трубе": № 2024112331: заявл. 06.05.2024: опубл. 18.07.2024 / Р.В. Бакулин, И.Ю. Голованов, К.О. Занина [и др.].
79. Кошелев, С.В. Анализ данных об интенсивности теплоотдачи в теплообменниках с пластинчатыми ребрами / С.В. Кошелев, А.И. Ейдеюс // Вестник Международной академии холода. – 2024. – № 1. – С. 13-20. – DOI 10.17586/1606-4313-2024-23-1-13-20.

80. Experimental Study of Heat Transfer of Different-Thickness Plate Modules of Heat and Mass Transfer Device / A.V. Stepykin, A.A. Sidyagin, D.M. Bukharov [et al.] // Journal of Engineering Thermophysics. – 2024. – Vol. 33, No. 1. – P. 102-109. – DOI 10.1134/S1810232824010090.
81. Experimental study of the hydraulic resistance of plate modules of a heat and mass transfer device / A.V. Stepykin, S.R. Ruzanov, A.A. Sidyagin [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – DOI 10.1007/s10556-024-01275-z.
82. Патент № AU2016290278B2 Австралия, МПК F28F 9/013, F28D 7/16. Кожухотрубное оборудование с антивибрационными перегородками и соответствующий способ сборки: № 2016290278: заявл. 03.06.2016: опубл. 29.04.2021 / Э. Рицци.
83. Патент № CN107850404В Китайская Народная Республика, МПК F28F 9/013, F28D 7/16. Кожухотрубное оборудование с антивибрационными перегородками и соответствующий способ сборки: № 201680040097.6: заявл. 03.06.2016: опубл. 06.03.2020 / Э. Рицци.
84. Патент № 2709399 С1 Российская Федерация, МПК F28F 9/013. Кожухотрубное устройство с антивибрационными перегородками и соответствующий способ сборки: № 2018104315: заявл. 03.06.2016: опубл. 17.12.2019 / Э. Рицци.
85. Патент № US20180224219A1 Соединённые Штаты Америки, МПК F28F 9/013, F28D 7/16. Кожухотрубное оборудование с антивибрационными перегородками и соответствующий способ сборки: № 15/741696: заявл. 03.06.2016: опубл. 09.08.2018 / Э. Рицци.
86. Патент № CN104949552В Китайская Народная Республика, МПК F28D 7/16, F28F 9/22. Кожухотрубный теплообменник: № 201410120054.1: заявл. 27.03.2014: опубл. 19.10.2016 / Сяо Шэн.
87. Патент № GB2313438А Великобритания, МПК F28D 7/16, F02M 26/32. Охладитель газа системы рециркуляции отработавших газов: № 9710383: заявл. 20.05.1997: опубл. 26.11.1997 / К. Такикава, С. Камото, Ю. Мияути, С. Ямото.
88. Патент № JP2001141386А Япония, МПК F28F 9/22, F28F 9/013. Многотрубный теплообменник: № 32725099: заявл. 17.11.1999: опубл. 25.05.2001 / К. Такигава, М. Сугияма, Ю. Мияути, Т. Гото.
89. Патент № 2502931 С2 Российская Федерация, МПК F28F 1/42. Теплообменник труба в трубе: № 2011150075/06: заявл. 08.12.2011: опубл. 27.12.2013 / И.В. Холодков, Е.Н. Головенкин, А.М. Ефремов [и др.]; заявитель Открытое акционерное общество "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнева".
90. Авторское свидетельство № 1318779 СССР, МПК F28D 7/10. Теплообменник типа труба в трубе: № 4000425: заявл. 30.12.1985: опубл. 23.06.1987 / В.И. Савченков, В.И. Сайко, В.Ф. Боровиков, А.В. Бородин.
91. Патент № US5915472А Соединённые Штаты Америки, МПК F28D 7/16, F02M 26/32. Устройство для охлаждения газа системы рециркуляции отработавших газов: № 08/858614: заявл. 20.05.1997: опубл. 29.06.1999 / К. Такикава, С. Ямото, Ю. Мияути.

92. Авторское свидетельство № 1305517 А1 СССР, МПК F28D 7/10. Теплообменник типа "труба в трубе: № 3965727: заявл. 17.09.1985: опубл. 23.04.1987 / Г.М. Хуторецкий; заявитель Центральное опытное проектно-конструкторское и технологическое бюро ГОСНИТИ по организации и технологии ремонта и технического обслуживания автомобилей "Авторемонт".
93. Патент на полезную модель № 225555 U1 Российская Федерация, МПК F28D 7/16, F28F 1/06. кожухотрубчатый теплообменный аппарат: № 2023130432: заявл. 22.11.2023: опубл. 24.04.2024 / А.М. Сехина, И.Ю. Голованов.
94. Патент на полезную модель № 222588 U1 Российская Федерация, МПК F28D 7/10, F28F 1/06. Теплообменный аппарат типа "труба в трубе": № 2023130128: заявл. 20.11.2023: опубл. 11.01.2024 / Н.И. Шувиков, М.Г. Лагуткин, И.Ю. Голованов.
95. Патент на полезную модель № 228345 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: № 2024119355: заявл. 10.07.2024: опубл. 23.08.2024 / А. Чернявский, В. Чернявская, И.Ю. Голованов.
96. Патент на полезную модель № 228347 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: № 2024119333: заявл. 10.07.2024: опубл. 23.08.2024 / А. Чернявский, В. Чернявская, И.Ю. Голованов.
97. Патент на полезную модель № 228348 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: № 2024117971: заявл. 28.06.2024: опубл. 23.08.2024 / В. Чернявская, А.М. Юрицына, И.Ю. Голованов.
98. Патент на полезную модель № 228443 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: № 2024119345: заявл. 10.07.2024: опубл. 28.08.2024 / А. Чернявский, В. Чернявская, И.Ю. Голованов.
99. Патент на полезную модель № 228447 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: № 2024119354: заявл. 10.07.2024: опубл. 29.08.2024 / А. Чернявский, В. Чернявская, И.Ю. Голованов.
100. Патент на полезную модель № 228927 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: № 2024119360: заявл. 10.07.2024: опубл. 17.09.2024 / А. Чернявский, В. Чернявская, И.Ю. Голованов.
101. Патент на полезную модель № 229196 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: № 2024117883: заявл. 27.06.2024: опубл. 25.09.2024 / В. Чернявская, А.М. Юрицына, И.Ю. Голованов.
102. Патент № CN1065044С Китайская Народная Республика, МПК F28F 1/40, F28F 1/42. Трубы с канавками для теплообменников установок кондиционирования и охлаждения и соответствующие теплообменники: № 94192366.5: заявл. 02.06.1994: опубл. 25.04.2001 / М. Мессан, В. Пине, Р. Предки.
103. Патент № FR2706197В1 Французская Республика, МПК F28F 1/40, F28F 1/42. Трубы с канавками для теплообменников установок кондиционирования и охлаждения и соответствующие теплообменники: № 9307021: заявл. 07.06.1993: опубл. 28.07.1995 / М. Мессан, В. Пине, Р. Предки.

104. Патент № 2100733 С1 Российская Федерация, МПК F28D 9/00, B21D 53/04. Пластинчатый теплообменник и способ изготовления пластинчатого теплообменника: № 96106157/06: заявл. 29.03.1996: опубл. 27.12.1997 / А.И. Худяков, Ю.С. Марков, И.И. Гальперин.
105. Патент № 2164332 С2 Российская Федерация, МПК F28D 9/00. пакет пластин для теплообменника: № 99104671/06: заявл. 02.03.1999: опубл. 20.03.2001 / В.В. Махалов; заявитель Открытое акционерное общество Уральский торговый дом "Логика".
106. Патент на полезную модель № 216818 U1 Российская Федерация, МПК F28F 3/08. пластинчатый теплообменный аппарат: № 2023101151: заявл. 19.01.2023: опубл. 02.03.2023 / А.М. Силин, М.Г. Лагуткин, И.Ю. Голованов.
107. Патент на полезную модель № 227085 U1 Российская Федерация, МПК F28F 3/08. Пластинчатый теплообменный аппарат: № 2024112567: заявл. 08.05.2024: опубл. 05.07.2024 / А.М. Силин, М.Г. Лагуткин, А.Е. Тюрина, И.Ю. Голованов.
108. Авторское свидетельство № 616521 А1 СССР, МПК F28F 1/26. Теплообменная труба: № 2469481: заявл. 29.03.1977: опубл. 25.07.1978 / В.Т. Буглаев, В.И. Калентьев, В.С. Казаков [и др.]; заявитель Брянский институт транспортного машиностроения.
109. Патент № US5692560А Соединённые Штаты Америки, МПК F28F 1/40, F28F 1/42. Трубы с канавками для теплообменников установок кондиционирования и охлаждения и соответствующие теплообменники: № 08/549808: заявл. 02.06.1994: опубл. 02.12.1997 / М. Мессан, В. Пине, Р. Предки.
110. Патент № FR1274618А Французская Республика, МПК F28F 1/42, F28D 7/10. Теплообменник и элементы для его изготовления, применимые, в частности, для охлаждения гексафторида урана: № 838620: заявл. 15.09.1960: опубл. 27.10.1961 / П. Легран.
111. Патент № FR2526145А1 Французская Республика, МПК F28D 7/14, A01J 9/04. Трубчатый теплообменник и установка для охлаждения жидкости, содержащая такой теплообменник: № 8207529: заявл. 30.04.1982: опубл. 04.11.1983 / П. Клерен.
112. Авторское свидетельство № 1219908 А1 СССР, МПК F28D 7/10. Теплообменный элемент типа "труба в трубе: № 3854204: заявл. 28.12.1984: опубл. 23.03.1986 / Л.Р. Кабо, М.В. Голяев, А.И. Коган; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.
113. Sapozhnikov, V.B. Evaluating the Performance of Low-Temperature Liquid Separation Devices with Two-Stage Refrigeration and Pre-Cooling / V.B. Sapozhnikov, M.A. Ugolnikova, V.V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – Vol. 59, No. 1-2. – P. 134-138. – DOI 10.1007/s10556-023-01218-0.
114. Патент на полезную модель № 228721 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: № 2024119361: заявл. 10.07.2024: опубл. 09.09.2024 / А. Чернявский, В. Чернявская, И.Ю. Голованов.
115. Патент на полезную модель № 229758 U1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: № 2024119353: заявл. 10.07.2024: опубл. 24.10.2024 / А.В. Чернявский, В. Чернявская, И.Ю. Голованов.

116. Патент № 2833685 С1 Российская Федерация, МПК В01Д 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: заявл. 06.06.2024: опубл. 28.01.2025 / В. Чернявская, А.М. Юрицына, И.Ю. Голованов.
117. Патент № 2836561 С1 Российская Федерация, МПК В01Д 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: заявл. 11.07.2024: опубл. 18.03.2025 / А.В. Чернявский, В.Чернявская, И.Ю. Голованов.
118. Патент № 2836564 С1 Российская Федерация, МПК В01Д 9/04. Ёмкостный криоконцентратор: заявл. 11.07.2024: опубл. 18.03.2025 / А.В. Чернявский, В. Чернявская, И.Ю. Голованов.
119. Методика сравнительной оценки кристаллизаторов на основании вычислительного моделирования и термодинамического анализа / В.В. Чернявская, В.Б. Сапожников, М.А. Угольникова, И.Ю. Голованов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2025. – № 11(161). – DOI 10.60797/IRJ.2025.161.21.
120. Сапожников В.Б. Оценка эффективности работы устройств низкотемпературного разделения жидких сред при двухступенчатом вымораживании с предварительным охлаждением / В.Б. Сапожников, М.А. Угольникова, В.В. Чернявская // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2023. – № 2. – С. 23–25.
121. Маринюк, Б.Т. Динамика намораживания водного льда на трубчатых элементах льдогенераторов / Б.Т. Маринюк, М.А. Угольникова // Холодильная техника. – 2016. – № 12. – С. 44-47.
122. Оценка влияния интенсификаторов теплообмена на энергомассовую эффективность кристаллизаторов / В.В. Чернявская, В.Б. Сапожников, И.Ю. Голованов, М.А. Угольникова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2025. – Т. 52, № 1. – С. 22-30. – DOI 10.21822/2073-6185-2025-52-1-22-30.
123. Степанов, М.Е. Эрлангенская программа Клейна и геометрия треугольника (часть вторая) / М.Е. Степанов // Моделирование и анализ данных. – 2016. – № 1. – С. 60-115.

**Голованов Иван Юрьевич
Угольникова Мария Андреевна
Чернявская Варвара Васильевна**

Технология кристаллизации и перспективы ее развития

Монография издана в авторской редакции

Сетевое издание

Ответственный за выпуск – Алимова Н.К.

Научное издание

Системные требования:

операционная система Windows XP или новее, macOS 10.12 или новее, Linux.

Программное обеспечение для чтения файлов PDF.

Объем данных 2,5 Мб

Принято к публикации «07» августа 2026 года

Режим доступа: <https://izd-mn.com/PDF/54MNNPM26.pdf> свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.,
англ.

ООО «Издательство «Мир науки»

«Publishing company «World of science», LLC

Адрес:

Юридический адрес – 127055, г. Москва, пер. Порядковый, д. 21, офис 401.

Почтовый адрес – 127055, г. Москва, пер. Порядковый, д. 21, офис 401.

<https://izd-mn.com/>

**ДАННОЕ ИЗДАНИЕ ПРЕДНАЗНАЧЕНО ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ
НА ЭЛЕКТРОННЫХ НОСИТЕЛЯХ**