



Техника блочного вымораживания [Текст] : монография / О. Г. Бурдо, С. И. Милинчук, В. П. Мордынский, Д. А. Харенко. - Одесса : Полиграф, 2011. - 294 с. : табл., рис. - Библиогр.: с. 278-288. - ISBN 978-966-2326-14-7.

Книга содержит сведения по развитию теории и техники разделения растворов новым методом - методом блочного вымораживания. Эффективность способа доказывается с помощью математического и экспериментального моделирования системы «пищевой раствор — блок льда - холодильная машина», привлекаются принципы эксергетического анализа. Рассматриваются перспективы механического, циркуляционного и акустического воздействия для интенсификации тепломассопереноса. Представляются инженерные методики расчета и оптимизации конструктивных и режимных параметров систем блочного вымораживания большой производительности для концентрирования и фракционирования различных пищевых растворов. Предлагаются новые многофункциональные аппараты для консервной, сахарной, пищевого концентрата, виноконьячной, мясомолочной и др. отраслей АПК.

Книга предназначена для студентов, магистров, аспирантов, докторантов, научных сотрудников, которые занимаются исследованием низкотемпературных процессов и разработкой холодильных технологий. Книга представляет интерес для специалистов - проектировщиков холодильного технологического оборудования для предприятий АПК.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время приоритетным направлением развития экономики Украины считается аграрный сектор. Серьезное внимание государства и частных инвесторов уделяется вопросам внедрения в Украине современных технологий выращивания сельскохозяйственного сырья [1]. Успех в реализации этих проектов обязательно определит следующий этап — развитие технологий хранения и переработки сырья. Мировой опыт показывает, что наибольшие перспективы связывают с низкотемпературными процессами переработки пищевого сырья. Обработка сырья при низких температурах гарантирует сохранение всего комплекса полезных

компонентов, обеспечивает производство пищевых продуктов, которые отвечают современным требованиям питания. Второе серьезное преимущество низкотемпературных технологий это экологическая безопасность, как пищевых продуктов, так и самого производства [2].

В условиях Украины ориентация перерабатывающих отраслей на низкотемпературные технологии имеет еще и дополнительные преимущества - это реанимация холодильной индустрии. Еще недавно холодильное машиностроение Украины занимало лидирующие позиции в мире. В стране еще сохранилась производственная база, специалисты, которые могли бы передать знания молодому поколению. Функционирует профессиональная школа подготовки молодых специалистов в области проектирования, эксплуатации и монтажа холодильных систем. Естественно, потребуются переоснащение отрасли, модернизация и разработка холодильного оборудования с учетом современных требований вплоть до анализа его полного жизненного цикла. Важным условием спроса на новое холодильное оборудование в Украине является его энергоемкость [3, 4].

Цель данной книги - ознакомить политиков, структуры власти, бизнес с перспективным научно - техническим направлением: технологией блочного вымораживания при обработке жидких пищевых систем. Исследования в этом направлении начаты более 25 лет назад. Основные положения технологии сформулированы в моей докторской диссертации [5]. Первые исследования [6] показали перспективность технологии блочного вымораживания, техническая идея которой была защищена авторским свидетельством на изобретение [7] и получила термин «технология блочного вымораживания». Отдельные направления технологии прошли комплексные исследования в рамках ряда диссертационных работ и обобщены в виде основ теории блочного вымораживания в монографии [2]. Основные результаты работы прошли апробацию в печати, на многочисленных научных конференциях и форумах [8 - 27].

Технология базируется на двух положениях. Во-первых, это гипотеза «термического парадокса», которая устанавливает сочетания конструктивных и режимных параметров аппарата, обеспечивающие предельные тепломассообменные характеристики. Во-вторых, это переход от традиционных машинных конструкций кристаллизаторов (при которых блок льда формируется на стадии сепарирования) к аппаратным системам (при которых блок льда формируется на стадии кристаллизации). Преимущества такой организации процессов вытекают из системного анализа установок. Достигается осязаемое снижение расхода электроэнергии, повышается надежность, упрощается конструкция и ее эксплуатация.

В настоящей книге проведено обобщение результатов исследований по созданию производительных установок блочного вымораживания для решения различных задач агропромышленного комплекса: криоконцентрирования, низкотемпературного фракционирования, генерации льда, деминерализации воды, пр. Эффективность многофункциональной установки блочного вымораживания обоснована методами математического

и экспериментального моделирования, термодинамического анализа, технико-экономической оптимизации, испытаниями опытных образцов.

Надеюсь, что книга будет полезна разработчикам новых прогрессивных технологий переработки пищевого сырья.

О.Г.Бурдо

ВВЕДЕНИЕ

Динамика развития перерабатывающей промышленности в мире показывает, что сегодня приоритетное положение занимают технологии, позволяющие обеспечить максимальное сохранение в готовом продукте вкусовых и пищевых свойств исходного сырья. В первую очередь это относится к пищевым продуктам, содержащим термолабильные компоненты, сохранить качество которых при термической обработке невозможно из-за значительных потерь их вкусовых, пищевых и цветовых показателей. Вторым важным показателем уровня пищевых технологий - является энергоемкость производства.

В настоящее время высококачественные украинские продукты не могут конкурировать на мировом рынке из-за значительной энергоемкости, которая в 2-4 раза выше, чем в развитых странах. Часто ключевым процессом, который определяет как качество, так и стоимость готового продукта является обезвоживание жидкостей. Такие задачи лежат в основе производства пищевых концентратов. Как правило, пищевые концентраты получают, удаляя из них часть воды. В Украине при производстве концентратов ежегодно выпаривается порядка 1-1,5 млн. т. воды, что в денежном эквиваленте составляет 300-400 млн. грн. При этом качество готового продукта не соответствует современным требованиям. Все это не позволяет Украине использовать в полной мере значительный потенциал производства пищевых продуктов.

Актуальной задачей развития пищевой промышленности в Украине является создание и освоение прогрессивных технологий переработки сельскохозяйственного сырья, которые обеспечат как высокое качество продукции, так и снижение энергетических затрат и повышение экономической эффективности производства.

Что касается южных регионов Украины, специализирующихся на выпуске пищевой продукции из всевозможных овощей и фруктов, то одной из важных задач перерабатывающих отраслей является создание технологий для получения высококачественных и относительно дешевых пищевых концентратов.

Комплексу современных требований отвечает метод блочного вымораживания, разработанный в ОНАПТ, основным отличием которого является формирование блока льда на стадии кристаллизации, а не сепарирования. Это создает благоприятные условия для осуществления

гравитационного сепарирования блока, упрощает конструкцию установки и снижает уровень энергетических затрат. Дальнейшее совершенствование технологии блочного вымораживания связано с организацией рекуперации энергии, накопленной в блоке льда, и созданием установок большой производительности. Представляется, что существующее противоречие между требованием повышения скорости вымораживания (образования цилиндрического блока на игольчатых кристаллизаторах) и задачами обеспечения высокой степени разделения в условиях большой производительности могут решаться путем формирования в объеме компактных плоскопараллельных блоков льда. Оптимизационным конструктивным параметром такой установки являются зазоры между кристаллизаторами для жидкой фазы. Вопросы снижения затрат электроэнергии эффективно решаются на основе рециклинга льда, полного использования энергии льда. Это сложная, многофакторная, системная задача.

Системный анализ и учет изменяющейся структуры продукта позволили решить гидротепломассообменную задачу формирования твердой фазы при блочном вымораживании, согласованную с термодинамической моделью генератора холода. Рециклинг льда на второй ступени конденсатора в комплексе решили энергетическую эффективность генератора холода и проблему гравитационного сепарирования.

Доказательством корректного решения вопросов кинетики льдообразования, взаимодействия раствора пищевого продукта, блока льда и типа системы охлаждения являются результаты испытания пилотного образца многофункционального блочного вымораживателя с рециклингом льда. Оригинальная схема вымораживающей установки содержит дополнительный конденсатор-плавитель. Методами эксергетического анализа доказана эффективность технологии блочного вымораживания при различных условиях эксплуатации по сравнению с традиционным выпариванием.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Список основных условных обозначений.....	8
ГЛАВА 1 ПРИНЦИПЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ЖИДКОСТЕЙ.....	9
1.1. Цель концентрирования пищевых жидкостей.....	9

1.2.Современные методы концентрирования.....	11
1.2.1. Концентрирование выпариванием.....	11
1.2.2. Мембранные технологии концентрирования.....	13
1.2.3. Криоконцентрирование.....	15
1.3. Сравнение методов концентрирования.....	18
1.4. Технологии промышленного концентрирования вымораживанием	

ГЛАВА 2 . ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ЖИДКОСТЕЙ ВЫМОРАЖИВАНИЕМ.....24

2.1. Этапы криоконцентрирования.....	24
2.1.1. Принципы кристаллизации.....	24
2.1.2. Принципы сепарирования.....	26
2.2. Оборудование для криоконцентрирования пищевых жидкостей.....	27
2.2.1. Кристаллизаторы.....	27
2.2.2. Сепараторы льда и раствора.....	32
2.3. Эволюция технологий вымораживания из растворов.....	37
2.3.1. Теплофизический аспект.....	37
2.3.2. Энергетический аспект.....	38
2.3.3. Пути совершенствования конструкций.....	40

ГЛАВА 3. МЕТОД БЛОЧНОГО ВЫМОРАЖИВАНИЯ.....44

3.1. Базовая схема.....	44
3.2. Гипотеза «термического парадокса».....	47
3.3. Термодинамический анализ систем блочного вымораживания.....	50
3.3.1. Феноменологическое описание кинетических эффектов при блочном вымораживании.....	50
3.3.2. Этапы формирования фаз.....	52
3.4. Принципы моделирования задач криоконцентрирования.....	56
3.4.1 Классификация методов расчета процессов.....	56
3.4.2 Процессы с ограниченным фронтом кристаллизации.....	58
3.4.3. Процессы массовой кристаллизации.....	66
3.5. Моделирование процессов блочного вымораживания пищевых растворов.....	70
3.5.1 Физическая модель.....	70
3.5.2Тепловая и диффузионная модели процесса.....	73
3.5.3Модель сопряженного тепломассопереноса при блочном вымораживании.....	75
3.5.4Моделирование теплофизических свойств.....	78

3.6. Процессы вымораживания в фазовых диаграммах.....	81
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЛОЧНЫХ ВЫМОРАЖИВАЮЩИХ УСТАНОВОК БОЛЬШОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ.....	84
4.1. Исходные предпосылки.....	84
4.2. Анализ компоновки концентраторов с различной формой кристаллизаторов.....	84
4.3. Основные процессы тепломассопереноса на плоских кристаллизаторах.....	88
4.4. Моделирование процессов тепломассообмена на пластинчатых кристаллизаторах.....	89
4.4.1. Теплофизическая схема плоского кристаллизатора.....	89
4.4.2. Модель тепломассопереноса при кристаллизации.....	91
4.4.3. Принципы расчета теплопереноса при блочном методе вымораживания (внешняя задача).....	94
ГЛАВА 5. КОНСТРУИРОВАНИЕ ПЛАСТИНЧАТЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ.....	97
5.1. Описание пластинчатого кристаллизатора.....	97
5.2. Принципы расчета теплопереноса в кристаллизаторе (внутренняя задача).....	98
5.3. Принципы расчета гидравлического сопротивления в прямоугольных каналах.....	102
5.4. Экспериментальное моделирование гидравлических характеристик прямоугольных каналов.....	104
5.4.1. Методика проведения эксперимента.....	104
5.4.2. Оценка погрешности экспериментов.....	105
5.4.3. Описание экспериментального стенда.....	106
5.4.4. Анализ экспериментальных данных.....	109
5.5. Испытания опытного образца кристаллизатора.....	110
ГЛАВА 6. КИНЕТИКА МАССОПЕРЕНОСА НА ПЛАСТИНЧАТЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРАХ.....	112
6.1. Методика экспериментального моделирования.....	112
6.1.1. Методика определения концентрации сухих веществ в продукте.....	112
6.1.2. Методика определения свойств раствора.....	113
6.1.3. Методика определения коэффициента массоотдачи.....	113
6.1.4. Методика обобщения результатов экспериментов.....	114
6.1.5. Оценка погрешности измерений.....	114

6.1.6. Методика проведения эксперимента по изучению тепло-массопереноса при вымораживании.....	119
6.2. Основные характеристики блока льда.....	120
6.3. Задачи и общая характеристика экспериментов.....	123
6.4. Описание экспериментальной установки.....	123
6.5. Анализ влияния ориентации поверхности кристаллизации.....	125
6.6. Кинетика блочной кристаллизации воды из модельных растворов.....	126
6.7. Изменение структурных характеристик блока в процессе вымораживания.....	131
6.8. Влияние сопряженного теплообмена на кинетику льдообразования при блочном вымораживании.....	133
6.9. Обобщение и анализ расчетно-экспериментальных данных процесса сепарирования.....	137

ГЛАВА 7. МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ.....140

7.1. Моделирование комбинированных процессов переноса при кристаллизации.....	140
7.1.1. Исходные положения.....	140
7.1.2. Механизм интенсификации теплообмена.....	142
7.1.3. Модель динамического пограничного слоя.....	144
7.2. Минимизация энергетических затрат при комбинированных процессах вымораживания.....	146
7.3. Формулировка математической задачи.....	149
7.4. Приведение математического описания краевой задачи к записи в безразмерных обобщенных переменных.....	151
7.5. Обобщение на основе волновых чисел подобия.....	154
7.6. Влияние способов перемешивания на кинетику.....	156
7.7. Оптимизация режимов работы холодильной системы и криоконцентратора с интенсификаторами.....	160

ГЛАВА 8. КРИОКОНЦЕНТРИРОВАНИЕ КОФЕЙНОГО ЭКСТРАКТА В УСТАНОВКАХ С ПЛАСТИНЧАТЫМИ КРИСТАЛЛИЗАТОРАМИ.....162

8.1. Теплофизические свойства кофеинного экстракта.....	162
8.2. Экспериментальные исследования процессов теплообмена на пластинчатом кристаллизаторе.....	165
8.2.1. Объект и программа экспериментальных исследований.....	165
8.2.2. Описание экспериментальной установки.....	166
8.2.3. Результаты экспериментальных исследований.....	169

8.3. Обработка экспериментальных данных.....	175
8.4. Испытания опытного образца криоконцентратора.....	177
ГЛАВА 9. КРИОКОНЦЕНТРИРОВАНИЕ САХАРНЫХ РАСТВОРОВ.....	180
9.1. Состав сока из свеклы.....	180
9.2 Обработка диффузионного сока из свеклы.....	181
9.3 Кинетика кристаллизации на вертикальных цилиндрических кристаллизаторах.....	182
9.4 Порядок экспериментальных исследований кинетики кристаллизации в поле акустических колебаний.....	189
9.4.1. Схема стенда с горизонтальным кристаллизатором.....	189
9.4.2. Принципиальная схема системы генерации акустических колебаний.....	191
9.4.3. Методика экспериментальных исследований влияния акустических колебаний на процессы кристаллизации.....	192
9.4.4. Тарировка генераторов акустических колебаний.....	194
9.5 Кинетика кристаллизации в поле акустических колебаний.....	196
9.5.1 Задачи исследований.....	196
9.5.2 Кинетика процессов вымораживания на цилиндрическом кристаллизаторе.....	197
9.5.3 Кинетика процессов вымораживания на горизонтальном кристаллизаторе.....	201
ГЛАВА 10. НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВЫМОРАЖИВАЮЩИХ УСТАНОВОК С ПЛАСТИНЧАТЫМИ КРИСТАЛЛИЗАТОРАМИ.....	204
10.1. Направления развития техники блочного вымораживания.....	204
10.2. Вымораживающие системы с рециклингом льда.....	207
10.2.1 Анализ термодинамических схем использования энергии льда.....	207
10.2.2. Термодинамические циклы с рекуперацией энергии льда.....	209
10.2.3. Термодинамическая модель компрессорной холодильной установки с рециклингом льда.....	212
10.3. Принципы снижения потребления электроэнергии.....	215
10.4. Схемы криоконцентраторов с перемешиванием раствора.....	217
10.5 Схемы криоконцентраторов полунепрерывного действия.....	219
ГЛАВА 11. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВЫМОРАЖИВАЮЩИХ УСТАНОВОК.....	223
11.1. Исходные данные для проектирования.....	223

11.2. Общие методы расчета криоконцентраторов.....	224
11.2.1. Определение температуры кипения холодильного агента.....	224
11.2.2.Определение количества удаленной влаги.....	224
11.2.3. Расчет процесса массопереноса на пластинчатом кристаллизаторе.....	225
11.2.4.Определение движущей силы процесса и площади поверхности кристаллизаторов.....	225
11.3. Конструктивный расчет.....	226
11.4. Поверочный расчет.....	227
11.5. Выбор холодильной машины.....	227
11.6. Методы расчета криоконцентраторов блочного вымораживания с использованием рециклинга льда.....	229
11.6.1.Анализ технологической схемы концентраторов.....	229
11.6.2.Общая характеристика расчетных задач.....	230
11.6.3.Обобщенная структура расчета кристаллизатора с рециклингом льда.....	231
11.6.4. Структура расчета теплофизических свойств раствора.....	233
11.6.5. Структура расчета фазовых равновесий.....	233
11.6.6. Структура расчета кинетики массопереноса.....	234
11.6.7. Структура расчета времени вымораживания.....	235
11.6.8. Структура расчета потребности установки в холоде.....	235
11.6.9. Схема расчета термодинамических свойств холодильного агента.....	236
11.6.10. Структура расчета холодильной машины с конденсатором - плавителем.....	237
11.6.11 Алгоритм расчета режимов криоконцентрирования методом блочного вымораживания с рециклингом льда.....	238
11.7. Порядок оценки экономической и энергетической эффективности.....	243
ГЛАВА 12. ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЛОЧНОЙ ВЫМОРАЖИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ.....	244
12.1. Оптимизация вымораживающих установок с пластинчатыми кристаллизаторами.....	244
12.2. Оценка экономической эффективности применения блочного вымораживания.....	251
12.3. Анализ термодинамической эффективности	

процессов концентрирования.....	253
12.4. Оптимизация режимов работы многофункционального вымораживателя с рециклингом льда.....	259
12.4.1. Описание пилотной установки.....	259
12.4.2. Сравнение расчетных данных с результатами испытаний пилотной установки.....	263
12.4.3. Многофункциональная установка для блочного вымораживания с рециклингом льда.....	268
12.5. Рекомендации к внедрению многофункциональной вымораживающей установки.....	270
12.5.1. Использование вымораживания в технологии концентрирования соков.....	270
12.5.2. Оптимизация режимов работы установки при концентрировании молочной сыворотки.....	271
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	276
ЛИТЕРАТУРА.....	278