

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

VI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІННОВАЦІЙНІ
ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ»**



ОДЕСА

2017

Публікуються доповіді, представлені на VI Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (4 – 8 вересня 2017 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

доктор техн. наук, професор

О.Г. Бурдо

Ю.О. Левтринська

Е.Ю. Ананійчук

О.В. Катасонов

Одеська національна академія харчових технологій, 2017 р.

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

Єгоров
Богдан Вікторович
Бурдо
Олег Григорович
Атаманюк
Володимир Михайлович
Васильєв
Леонард Леонідович
Гавва
Олександр Миколайович
Гумницький
Ярослав Михайлович
Долинський
Анатолій Андрійович
Зав'ялов
Владимир Леонідович
Керш
Владимир Яковлевич
Колтун
Павло Семенович
Корнієнко
Ярослав Микитович
Малежик
Іван Федорович
Михайлов
Валерій Михайлович
Паламарчук
Ігор Павлович
Снежкін
Юрій Федорович
Сорока
Петро Гнатович
Тасімов
Юрій Миколайович
Товажнянський
Леонід Леонідович
Ткаченко
Станіслав Йосифович
Ульєв
Леонід Михайлович
Черевко
Олександр Іванович
Шит
Михайл Львович

- голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
- вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
- Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
- Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н., професор
- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
- Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАНУ
- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Одеська державна академія будівництва та архітектури, д.т.н., професор
- Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
- Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н., професор
- Вінницький національний аграрний університет, д.т.н., професор
- Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., член-кор. НАНУ
- Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
- Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
- Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
- Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
- Національний технічний університет Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
- Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н., професор
- Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ БЛОКА ЛЬДА

Тришин Ф.А к.т.н, Трач А.Р. магистр
Одесская национальная академия пищевых технологий

APPROACHES TO MODELING OF THE PROCESS OF FROZENING ICE BLOCK

Trishin F.A.Sc., Trach A.R. master
Odessa National Academy of Food Technologies

Аннотация: Исследование процесса теплопередачи в реальных условиях сопряжено с большими трудностями, вследствие сложности и нестационарности процессов, поэтому важность приобретает теоретический анализ и построение моделей. Было проведено численное моделирование влияния пористости на процесс кристаллизации, установлено, что пористость блока льда является значительным фактором, влияющим на формирование двухфазного слоя. Были предложены пути моделирования пористости блока льда с использованием стохастических методов моделирования, теории фракталов и теории перколяции.

Abstract: Research of heat transfer process is very difficult in the real world, due to the complexity and nonstationarity this processes. That is why theoretical analysis and theoretical models are so important. The numerical model of heat transfer process was obtained in current work. Various models have been proposed for modeling porosity

Ключевые слова: моделирование, кристаллизация, пористость, концентрация, температура, теплопередача, перколяция, фракталы.

Keywords: modeling, crystallization, porosity, concentration, temperature, heat transfer, percolation, fractals.

Введение. Несмотря на то, что пресная вода составляет незначительную долю водных ресурсов Земли, она определяет уровень и саму возможность жизни на суше. Качество пресной воды имеет большое значение для человека и его хозяйственной деятельности. Лишь одна сотая доля всех мировых ресурсов пресных вод может быть основным источником водоснабжения человечества. Ежегодно в мире тратится 5000 км³ пресной воды, или 11% годового стока всех рек мира. Доступные природные ресурсы пресной воды крайне неравномерно размещены на нашей планете, значительная часть крупнейших рек мира протекает в малонаселенных регионах. В густонаселенных областях относительно немного больших рек, и их воды интенсивно используются. Все это усложняет водоснабжения человечества, на текущий момент примерно одна треть населения Земли испытывает дефицит пресной воды [1,2].

К 2025 году в связи с ростом численности населения, ситуация существенно ухудшится. Такие перспективы значительно повышают важность очистки воды. До сих пор основным методом очистки воды остается ее дистилляция, однако энергетическая эффективность такого метода не слишком высока. В Украине принят Закон об энергосбережении [3], который стимулирует потребителей к рациональному использованию и экономному потреблению первичной и преобразованной энергии и природных энергетических ресурсов. В связи с этим широко распространяются альтернативные способы очистки воды. Возрастает интерес к использованию низкотемпературных технологий водоподготовки, и, в частности, к технологиям блочного вымораживания. Для установок этого типа характерны простота конструкции, компактность и энергетическая эффективность. Принцип блочного вымораживания устраняет системные потери холода, которые характерны для традиционных установок криоконцентрирования [4].

Моделирование теплопередачи при направленной кристаллизации. Поскольку качество процесса напрямую зависит от качества управления им, возникает проблема управления процессами теплопередачи при направленной кристаллизации. Исходя из требований энергоэффективности, исследование методик управления процессом теплопередачи при направленной кристаллизации представляет большое научное и практическое значение для решения проблем обеспечения чистой водой. Исследование процесса теплопередачи в реальных условиях сопряжено с большими трудностями, вследствие сложности и нестационарности процессов, поэтому важность приобретает теоретический

анализ и построение моделей. В данной работе рассмотрим подходы к моделированию процесса вымораживания, а также рассмотрим возможные модели влияния пористости на процесс вымораживания.

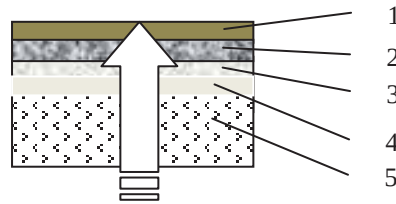


Рис.1. Физическая модель процесса вымораживания.

При направленной кристаллизации на горизонтальной поверхности 1, температура которой ниже криоскопической температуры, формируется подложка в виде твердой фазы 2. Ниже растет двухфазный слой 3, состоящий из льда и раствора. Поверхность двухфазной зоны и раствор 5 разделяет пограничный слой 4.

Управление процессом направленной кристаллизации основано на обеспечении необходимых условий формирования двухфазного слоя. Разность температур раствора и поверхности 1 определяют плотность теплового потока q и массовый поток льда $M_{\text{л}}$. Сложность моделирования процессов по схеме (рис.1) заключается не только фазовыми переходами, но и изменением по высоте слоя структуры двухфазного слоя. Нельзя игнорировать градиенты температур, концентраций и пористости по высоте слоя. Более того, эпюры этих параметров имеют нелинейный характер. От величины температуры в точке зависит концентрация раствора и пористость, а эти параметры определяют термическое сопротивление, т.е. производительность по росту льда и распределение температур в слое. Таким образом, задача является нелинейной, нестационарной и осложненной фазовыми переходами [5,6].

В идеальном теплофизическом представлении процесс направленной кристаллизации должен проходить при выращивании подложки с нулевой пористостью. Такой консервативный способ управления процессом должен протекать при минимальной разнице температур, практически при криоскопической температуре. Теоретически обеспечится нулевая пористость, однако скорость формирования блока льда будет бесконечно низкой. Любые методы интенсификации приведут к росту скорости намораживания, но ценой получения пористой структуры. На рисунке 2 представлена фотография блока льда, на которой заметна его пористая структура.



Рис 2. Пористая структура блока льда полученного в установке блочного вымораживания.

В процессе кристаллизации температура (t_p), концентрация (X_p) и пористость (ε) каждого среза слоя меняются, поэтому:

$$\lambda_e(h) = \varepsilon(h) \cdot \lambda_p(t, X_p) + (1 - \varepsilon(h)) \cdot \lambda_l(t) \quad (1)$$

Поскольку найти аналитическое решение проблемы достаточно проблематично, логичным кажется провести численное моделирование процесса кристаллизации. Полученное семейство графиков представлено на рисунке 3.

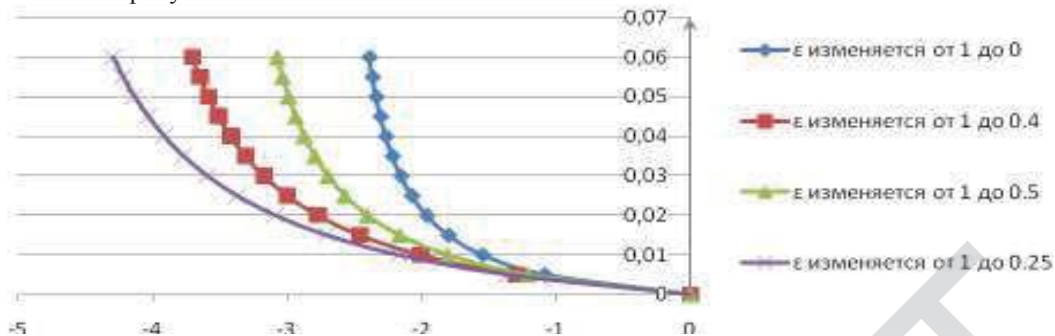


Рис. 3. Графики зависимости $t(h)$ когда значение ε изменяется по линейному закону.

По приведенным графикам можно сделать вывод, что возможность эффективного воздействия на процесс кристаллизации во многом определяется достоверностью представлений о строении пористой структуры льда, поэтому актуальной является задача моделирования этой структуры и определение ее влияния на процессы тепло- и массообмена. Как показывает обзор литературы, эта проблема еще не решена в полной мере.

Подходы к моделированию пористых систем. Выделяют несколько характерных моделей физического моделирования пористых систем [7], отражающих как корпускулярное строение пористых систем, так и губчатое. Исходя из этого все модели делятся на глобулярные и капиллярные.

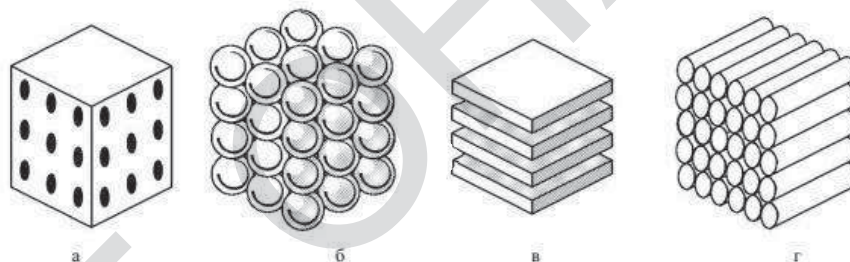


Рис. 4. Некоторые модели пористых систем: а - цилиндрические капилляры, б - полуупакованные сферы, в - параллельные пластины, г - полуупакованные цилиндры.

В глобулярных моделях (рис. 4 б, в, г) основой являются единичные элементы геометрической формы, уложенные определенным образом, поры отражены в глобулярных моделях как пустоты между элементами (глобулами), а плотность укладки глобул отображается коэффициентом их упаковки и зависит от формы глобул и способа их упаковки.

В капиллярных моделях свободный объем представляется как совокупность капилляров различного сечения, протяженности и ориентации в пространстве. Простой капиллярной моделью является губчатая модель с цилиндрическими прямыми капиллярами, которые не пересекаются (Рис. 4а). Такая модель, однако, не учитывает естественных для реальных структур непрямолинейности и неодинаковости сечений пор, поэтому для уточнения модели и учета свойств капилляров модели последних.

Следует отметить, что приведенные выше способы моделирования удовлетворительно работают только для промышленно созданных материалов, поскольку для них заранее известны основные размеры частиц, эквивалентный радиус пор и технология производства материала. Структуры природных веществ находятся под влиянием разнообразных случайных факторов, что значительно усложняет построение достоверной физической модели. В такой ситуации целесообразно применять стохастические методы моделирования, теорию фракталов и теорию перколяции.

Использование фракталов при изучении пористых структур базируется на их свойстве самоподобия. Это означает объект, в точности или приближенно совпадающий с частью себя самого, то есть целое

имеет ту же форму, что и одна или более его частей. Опираясь на вышесказанное, можно представить пористую структуру некоторым фракталом, например губкой Менгера [8], представленной на рис 5.



Рис 5. Губка Менгера - геометрический фрактал, один из трехмерных аналогов ковра Серпинского, изображена на 4й итерации.

Следует учитывать, что исследование природных объектов сопряжено с большими трудностями, поскольку у них, как правило, отсутствует точное самоподобие, поэтому используется понятие топологического самоподобия или самоафинности. Нужно принимать во внимание, что в общем случае количество итераций фрактала – бесконечно, однако при моделировании реальных объектов это число ограничено.

Большое значение при моделировании пористости природных объектов приобретает также теория перколяции [9]. Формирование современного математического аппарата этой теории, а также терминологии связывают с работой Бродбента и Дж. Хаммерсли от 1957 года, в которой они рассматривают общую задачу о начальной фазе течения некоторой жидкости через случайно неоднородную проницаемую среду. Простейшей моделью, с которой обычно начинается рассмотрение критических показателей перколяционного процесса, является регулярный четырехсвязный планарный граф, достижимость произвольного выделенного узла в котором задается некоторой случайной величиной P_{ij} . Пример такого перколяционного процесса на конечной решетке представлен на рисунке 6.

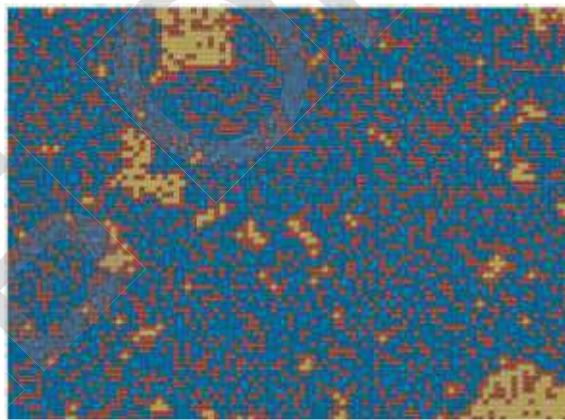


Рис 6. Перколяционный кластер (решетка размером 100x100 узлов, $P_{ij}=65\%$)

Используя фрактальный анализ стохастической структуры возможно определить некоторые усредненные параметры, характеризующие ее строение, что позволит использовать их в практических расчетах для определения показателей тепло- и массообмена.

Выводы

1. Было установлено, что пористость структуры льда оказывает значительное влияние на процессы тепло- и массообмена. Таким образом, актуальной становится теоретическая разработка методов для исследования и моделирования пористости.
2. Штучные пористые структуры могут быть промоделированы методами геометрического моделирования, которые, однако, становятся непригодными к использованию при появлении стохастических возмущений.

3. Природные образования носят стохастическую и фрактальную природу, поэтому целесообразным выглядит применение для исследований аппарата фрактальной геометрии и теории перколяции.

Литература

1. Мидоренко Д. А. Мониторинг водных ресурсов: Учеб. пособие. / Д. А. Мидоренко, В. С. Краснов. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2009. – 77 с.
2. Хвесик М. А. Водні ресурси – інвестиція сьогодення і перспектива майбутнього / М. А. Хвесик, В. М. Мандзик. // Інвестиції: практика та досвід. – 2009. – №1. – С. 2–8.
3. Закон України «Про енергозбереження» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>.
4. Антипов С. Т. Тепло- и массообмен при концентрировании жидких сред вымораживанием / С. Т. Антипов, В. Е. Добромиров, В. Ю. Овсянников. – Воронеж: гос. технол. акад. Воронеж, 2004. – 208 с.
5. Бурдо О. Г. Процессы кристаллизации воды в ультразвуковом поле / О. Г. Бурдо, Ф. А. Тришин, А. Р. Трач. // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. – 2014. – С. 80–86.
6. Бурдо О. Г. Моделирование процесса кристаллизации воды в ультразвуковом поле / О. Г. Бурдо, Ф. А. Тришин, А. Р. Трач. // Харчова наука і технологія. – 2015. – С. 75–80.
7. Методи моделювання пористих середовищ, що проводять / П. Ф.Буданов, Ю. С. Олійник, А. Г. Сіліна, А. М. Чернюк. // Системи обробки інформації. – 2015. – №5. – С. 51–55.
8. Menger sponge [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Menger_sponge.
9. Москалев П. В. Математическое моделирование пористых структур / П. В. Москалев, В. В. Шитов. – Москва: Физматлит, 2007. . – 120 с.

УДК 621.75:541

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Бурдо О.Г., д-р техн. наук, профессор, Давар Ростами Пур, фирма «D.R.P.», Teheran, Iran, Масельская Я.А., магистрант факультета ЭТОиТД, ОНАПТ

MATHEMATICAL MODEL OF THE DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION PROCESS

Burdo O.G., Dr. Tech. Sci., Professor, Davar Rostami Pur, firma "D.R.P.", Teheran, Iran, Maselskaya Ya.A., graduate student of the Faculty of ETE & TD, ONAPT

Аннотация. Рассмотрены мировые тенденции на рынке соков. Анализируются перспективы гранатового сока в Украине. Сравниваются современные технологии концентрирования соков. Показаны преимущества низкотемпературных методов концентрирования. Обоснованы перспективы технологий блочного вымораживания для получения концентрированного гранатового сока.

Abstract. The world trends in the juice market are considered. The prospects of pomegranate juice in Ukraine are analyzed. Contemporary technologies of juicing are compared. The advantages of low-temperature methods of concentration are shown. The prospects of block freezing technologies for obtaining concentrated pomegranate juice are grounded.

Ключевые слова: гранатовый сок, концентрирование сока, низкотемпературные методы концентрирования, технологии блочного вымораживания.

Key words: pomegranate juice, juice concentration, low-temperature methods of concentration, technologies of block freezing.

Введение. Представляется, что важным параметром, определяющим эффективность процесса блочного вымораживания, является форма кристаллизаторов и их компоновка в емкости концентратора.

Безбах И. В., Кепин Н. И.	
ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЭКСТРАКЦИИ, ИСПОЛЗУЮЩИХСЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ	
Недбайло А. Є.	285
КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ	
Тришин Ф. А., Терзиев С. Г., Орловская Ю. В.	289

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ

ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОНВЕКТИВНО – ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО СУШІННЯ	
Малежик І. Ф., Бурлака Т. В., Дубковецький І. В., Деканський В. Є.	296
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОМІРЧАСТОЇ МОДЕЛІ ІЗ ЗВОРОТНИМИ ПОТОКАМИ В ВІБРОЕКСТРАКТОРАХ	
Мистюра Т. Г., Зав'ялов В. Л., Лобок О. П., Попова Н. В., Запорожець Ю. В.	302
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ІННОВАЦІЙНИХ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ПОЛІМЕРІВ	
Бухкало С. І.	309
ДОСВІД РОЗРОБКИ КОМП'ЮТЕРНО - ІНТЕГРОВАНОГО СТЕНДУ ДЛЯ СУПРОВОДУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ МІКРОХВИЛЬОВОГО-ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ	
Яровий І. І.	313
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО КЛАСТЕРА В ПРОЦЕССАХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ	
Иваницкий Г. К.	319
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭКСТРАКТА СТЕВИИ В МИКРОВОЛНОВОМ ВАУУМ-ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ	
Бурдо О. Г., Ружицкая Н. В., Резниченко Т. А., Резниченко Д. Н.	322
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН – КАУЧУК	
Гоцький Я. Г., Двойнос Я. Г.	327
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ	
Бурдо О. Г., Давар Ростами Пур	335
ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОНАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ПІКОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ	
Остапенко О. П.	331
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФА И БИОМАССЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВ	
Снежкин Ю. Ф., Коринчук Д. Н.	337
ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ БЛОКА ЛЬДА	
Тришин Ф. А., Трач А. Р.	343
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ	
Бурдо О. Г., Давар Ростами Пур, Масельская Я. А.	347
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКИ	
Бурдо О. Г., Маренченко Е. И., Пилипенко Е. А., Балагура В. В.	355
АНАЛІЗ ОПОРІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ РЕЧОВИНИ ЧЕРЕЗ МЕМБРАНУ ПРИ НАНОФІЛЬРАЦІЇ ТА ЗВОРОТНОМУ ОСМОСІ	
Гулієнко С. В.	364
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТИТЕЧІЙНОГО ЕКСТРАКТОРА З ПІДВОДОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ	
Левтринська Ю. О., Зиков А. В., Терзів С. Г.	367
К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ КАПЕЛЬ ХЛАДАГЕНТА В ФИЛЬТРЕ ЭЖЕКТОРЕ	
Когут В. Е., Бушманов В., Хмельнюк М. Г.	374