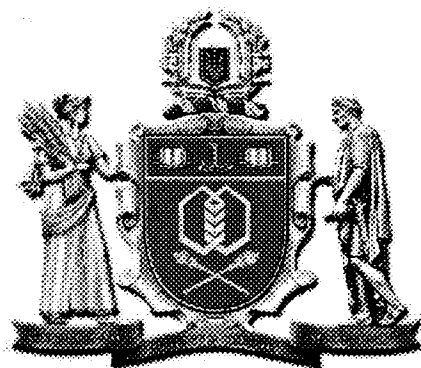


ISSN 2073 – 8730

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

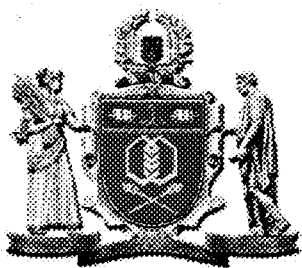
НАУКОВІ ПРАЦІ

**ВИПУСК 47
ТОМ 1**



ОДЕСА

2015



Міністерство освіти і науки України

НАУКОВІ ПРАЦІ ОНАХТ

Випуск 47, том 1, 2015

серія

Технічні науки

Засновник:

Одеська національна
академія харчових
технологій

Засновано в Одесі
у 1937 р.

Відновлено з 1994 р.

Наукові праці ОНАХТ входять до нового Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Бюлетень ВАК України, №5, 2010).

Головний редактор

Заступник головного редактора

Відповідальний редактор

Єгоров Б.В., д-р техн. наук, проф.

Капрельяни Л.В., д-р техн. наук, проф.

Бурдо О.Г., д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія:

Амбарцумян Р.В., д-р техн. наук, проф.

Безусов А.Т., д-р техн. наук, проф.

Віннікова Л.Г., д-р техн. наук, проф.

Гапонюк О.І., д-р техн. наук, проф.

Жигунов Д.О., д-р техн. наук, доцент

Іоргачева К.Г., д-р техн. наук, проф.

Коваленко О.О., д-р техн. наук, ст. наук. співр.

Крусір Г.В., д-р техн. наук, проф.

Мардар М.Р., д-р техн. наук, проф.

Мілованов В.І., д-р техн. наук, проф.

Осипова Л.А., д-р техн. наук, доцент

Павлов О.І., д-р екон. наук, проф.

Плотніков В.М., д-р техн. наук, доцент

Савенко І.І., д-р екон. наук, проф.

Тележенко Л.М., д-р техн. наук, проф.

Ткаченко Н.А., д-р техн. наук, проф.

Ткаченко О.Б., д-р техн. наук, доцент

Хобін В.А., д-р техн. наук, проф.

Хмельнюк М.Г., к.т.н., доцент

Станкевич Г.М., д-р техн. наук, проф.

Черно Н.К., д-р тех. наук, проф.

За достовірність інформації

відповідає автор публікації

ББК 36.81 + 36.82

Реєстраційне свідоцтво
КВ №12577-1461 ПР
від 16.05.2007р. Видано
Міністерством юстиції України.

Усі права захищені.
Передрук і переклади
дозволяються лише зі згоди
автора та редакції.

Рекомендовано до друку
Вченою радою Одеської
національної академії харчових
технологій,
протокол № 12 від 02.06.2015 р.

Мова видання:
українська, російська,
англійська

УДК 663 / 664

Одеська національна академія харчових технологій

Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій

Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 2015. – Вип. 47. – Том 1. – 203 с.

Адреса редакції:

вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039

© Одеська національна академія харчових
технологій, 2015 р.

ТЕХНОЛОГИИ НАПРАВЛЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ В АПК

Бурдо О.Г., д-р техн. наук, профессор

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

В работе дано определение и классификация технологий направленного энергетического действия (НЭД). Сформулированы гипотезы перевода сушильных процессов на НЭД технологии. Обсуждаются режимы ламинарной и турбулентной диффузии. Анализируется механизм и эффект механодиффузии при экстрагировании. Проведено сравнение энергетической эффективности различных способов обезвоживания на основе числа энергетического действия.

In current work a definition and classification of directed energy action (DEA) technologies is given. The hypotheses of drying processes conversion to DEA technologies are formulated. The regimes of laminar and turbulent diffusion are discussed. The mechanism and effect of mechanodiffusion in extraction are analyzed. The comparison of different dehydration methods energy efficiency based on energy action number is carried out.

Ключевые слова: энерготехнологии, сушка, экстрагирование, энергетическая эффективность.

Введение. Обеспечение человечества энергетическими ресурсами является одной из ключевых проблем настоящего времени. Особенно это касается АПК, который является одним из лидеров по потреблению энергетических ресурсов в Украине. [1]. Отсутствие системного подхода к исследованию энерготехнологических проблем, опыта в решении задач эффективного использования энергии в АПК усугубляют энергетический кризис в Украине [1].

Целью работы является совершенствование теплотехнологий АПК путем модернизации традиционных схем и разработки принципиально новых технологий тепломассопереноса гарантирующих безопасность пищевого продукта при существенном снижении энергетических затрат.

Общая научно-техническая идея разработок выражается в использовании принципов адресной доставки энергии к продукту, к его элементам. Объектом исследований стали зерносушильные установки, в которых кроме серьезных энергетических проблем не решены требования по экологической безопасности продукта. Последовательно проведена модернизация базовых конвективных сушилок, предложены принципиально новые технические решения. Исследуются низкоэффективные экстракционные технологии АПК, предлагаются новые решения и принципы.

В работе впервые поставлена и решается задача организации технологий направленного энергетического действия (НЭД). Показано, что энергетика является не только характеристикой, основным результатом технологии, но и инструментом организации технологии, средством управления кинетикой процессов переноса в элементах различных систем. Развитие технологий должно идти по пути направленного, селективного подвода энергии к тем элементам сырья, которые требуют энергетического воздействия. При этом термолабильные элементы сырья должны минимально подвергаться энергетическому воздействию. Особое внимание следует уделять микро- и наноразмерным структурам сырья. Эти элементы в традиционных технологиях практически не рассматриваются. Определены перспективы НЭД - технологий.

Классификация НЭД- технологий. НЭД – технологии – это технологии направленного, селективного действия на элементы сырья и биологические объекты. НЭД- нанотехнологии отличаются тем, что направление энергетического действия – наномасштабные объекты, микро- и наномасштабные структуры. И в первом, и во втором случаях задачей селективного энергетического воздействия является управление полями, сложение направлений силовых воздействий слабых полей, организация потока из микро- и нанокapиллярной структуры, формирование состава этих потоков, направление силовых воздействий на оболочки клеточной структуры микробиологических объектов и т.п. [2].

Для пищевых систем снижение количества потребленной энергии не только повысит энергетический КПД процесса и снизит себестоимость продукта, но и уменьшит уровень термического воздействия на продукт. Это приведет к сохранению термолабильных и биологически активных компонентов пищевого сырья. Например, пищевые продукты и кулинарные изделия, полученные по НЭД, станут отвечать требованиям функционального питания.

Эффективность пищевых технологий (производительность, удельная энергоемкость, качество готового продукта, степень извлечения ценных компонентов сырья и пр.) в значительной степени определяется возможностями воздействий на оболочки клеток, микроорганизмы, поры, капилляры и пр. Ставится

задача найти эффективные принципы, подходы для локальных действий, направленных на интенсивные, низкоэнергетические операции с пищевым сырьем, и, даже, с отдельными наноразмерными элементами этого сырья. Важно создать фундаментальные основы эволюционных нанометрических явлений и процессов. Один из путей в этом направлении – это НЭД - технологии. С позиций сегодняшнего дня [2 - 4] можно так прогнозировать развитие НЭД - технологий обезвоживания сырья (рис.1). Принципы удаления влаги на основе электромагнитной энергии не всегда отвечают смыслу термина «сушка». Поэтому в работе используется термин более широкого смысла – обезвоживание.

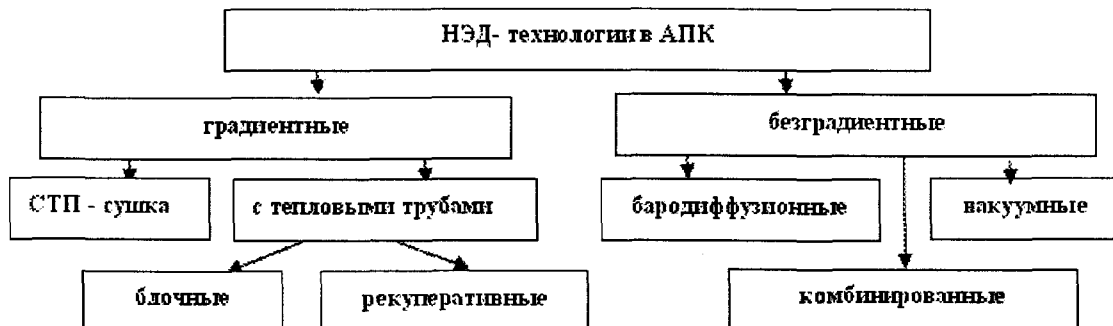


Рис. 1 – Классификация НЭД-технологий в АПК.

Сушка. Рассмотрим перспективы НЭД- технологий в сушильной технике. В пищевых и перерабатывающих производствах сушка, как правило, определяет и себестоимость, и качество продукта.

Наибольшее распространение здесь получили конвективные способы сушки. Для такого способа сушки характерно серьезное научно-техническое противоречие. Стремление достичь высоких коэффициентов тепло-массопереноса требует повышать скорость теплоносителя, т.е. его расход. Однако при этом пропорционально растут и потери теплоты с отработавшим сушильным агентом, что в условиях энергетического кризиса нежелательно. Принятая в странах постсоветского пространства практика сушки зерна смесью топочных газов и воздуха не исключает возможность загрязнения продукта канцерогенными веществами. Поэтому в условиях энергетического кризиса, стабильного роста стоимости энергоносителей энергетические и экологические концепции сушки требуются пересмотреть.

Сушка смешанным теплоподводом (СТП) активно развивается харьковской научной школой [5]. Использовать возможности тепловых труб (ТТ) в сушильной технике впервые предложено в ОНАПТ [4]. На первом этапе был создан утилизатор теплоты на тепловых трубах. Оригинальная компоновка аппарата обеспечила режим «самоочищения» теплопередающей поверхности. Производственные апробации теплоутилизатора в схемах сушки растворимого кофе, сахара и зерна подтвердили высокую эффективность аппарата, обеспечивалось снижение расхода топлива от 10 до 25 % [4]. На втором этапе ставилась задача создания зерносушильной техники 2 поколения, обеспечивающей экологическую безопасность зерна при существенном снижении расхода топлива. В основе разработок принцип адресной доставки энергии к продукту и следующие гипотезы.

Гипотеза 1. Разделение теплоносителя на два потока, один из которых циркулирует по контуру «тепловой генератор – зона нагрева зерна – тепловой генератор» и с помощью конденсаторов ТТ нагревает зерно перед сушкой, после чего в калорифере из ТТ греет воздух до температуры сушильного агента и возвращается в теплогенератор, а другой поток – горячий воздух из калорифера продувается сквозь зерновой поток, увлажняется и выбрасывается в атмосферу, позволит до 40 % теплоносителя пустить на рециркуляцию, что существенно снизит потери энергии с отработавшим теплоносителем. Конструкция зоны нагрева зерна на основе ТТ обеспечивает экологическую безопасность зерна, организацию равномерного подвода энергии к продукту и эффективное его перемешивание и согласует темпы процессов тепло- и массопереноса. Тепловой КПД такой блочной зерносушилки повышается до 60 %.

Развитие эта техническая идея получила в гипотезе 2, что привело к конструкции рекуперативной зерносушилки.

Гипотеза 2. Если снять с воздуха задачу теплоносителя, а оставить ему функцию только диффузионной среды, организовать адресный подвод энергии к потоку зерна системой ТТ, испарители которых обогреваются топочными газами (или любым другим источником энергии), то можно полностью обеспечить предварительный нагрев зерна за счет энергии выбросов из зоны сушки, сократить время и энергетические затраты и гарантировать получение безопасного продукта.

Первые две гипотезы обуславливают переход на принципиально новые конструкции шахтных зерносушилок, по сути, речь идет про сушилки 2 поколения.

Реализация 2 гипотезы позволит повысить тепловой КПД шахтной зерносушилки до 80 – 85 % [4]. На этом возможности градиентных принципов сушки по снижению энергетических затрат исчерпываются.

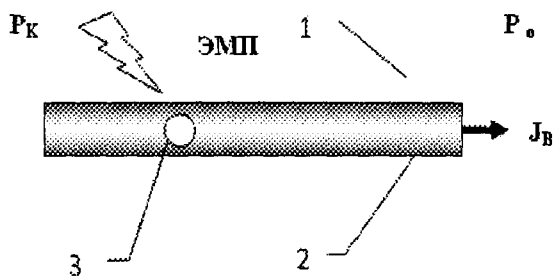
Сушилки 3 поколения требуют принципиально новых подходов. Формулируется 3 гипотеза.

Гипотеза 3. Применение при обезвоживании зерна адресной доставки энергии непосредственно к влаге в объеме зерновки позволит инициировать мощный, специфичный гидродинамический поток, который возникает при взаимодействии электромагнитного поля с полярными молекулами влаги в капиллярах. Это приведет к удалению воды не только в паровой фазе, а туманом, существенно повысит интенсивность массопереноса за счет резкого снижения внутреннего диффузионного сопротивления, уменьшению энергетических затрат и времени процесса обезвоживания.

Третья гипотеза связана с радикально новыми способами организации процесса обезвоживания, с привлечением принципов наноэнерготехнологий для развития бародиффузионных процессов [2, 4].

Эффект и механизм бародиффузии. Исходя из термодинамической схемы нанопроцесса [2, 6, 7] механизм комбинированного нано- и макропереноса влаги из волокнистой структуры в поток поясняется схемой (рис.2). В отличие от традиционных способов сушки анализируемые процессы характеризуются сопряженным протеканием процессов с разными по своей природе движущими силами [2].

Во-первых, имеет место чисто диффузионный процесс (J_D), который зависит от коэффициента диффузии D с соответствующей движущей силы. Далее развивается конвективная диффузия (поток J_K), интенсивность которой определяется коэффициентом массоотдачи β . При этом, наибольшие диффузионные сопротивления будут для нано- и микрокапилляров сырья, где наиболее стесненные условия. В условиях действия микроволнового поля (ЭМП) параллельно движению массовых потоков J_D и J_K возникает еще один поток J_B (рис.2). Это бародиффузия.



1 – продукт; 2 – капилляр; 3 – паровой пузырь.

Рис. 2 – Механизм бародиффузии

Это специфический, гидродинамический поток, который возникает от того, что в глубине капилляра часть воды переходит в пар, что приводит к росту давления внутри капилляра (P_K). Давление, которое обеспечивает «запуск» бародиффузии $P_{БД} = P_0 + P_K$. При достижении давления $P_{БД}$ происходит выброс жидкости и пара из глубины капилляра. Частота выбросов и количество функционирующих капилляров увеличивается пропорционально электрофизическому воздействию. Массовый поток J_B зависит от разности давлений в капилляре P_K и среды P_0 , а также от коэффициента массоотдачи β' , который может существенно отличаться от β :

$$J_B = \beta' \cdot (P_K - P_0) \quad (1)$$

Поток, возникающий под действием электромагнитного поля, турбулизирует приграничный слой, сопротивление массопереносу может быть на порядок ниже, чем в традиционных схемах массоотдачи. Соответствующее давление в i -м капилляре рассчитывается по классическому уравнению гидравлической сети с учетом сил поверхностного натяжения, которые могут быть значительными в микро- и нанокапиллярах. Следовательно, давление в капилляре определяют параметры: d_i, l_i – диаметр и – длина капилляра; w – скорость жидкости в капилляре; ρ – плотность жидкости; ξ – местные сопротивления; σ – силы поверхностного натяжения; λ – коэффициент гидравлического трения; g – ускорение свободного падения.

$$P_{K_i} = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left[\frac{\lambda \cdot l_i}{d_i} + \sum \xi \right] + \rho \cdot g \cdot l_i + \frac{\sigma}{d_i} \quad (2)$$

Краевая задача массопереноса в условиях микроволнового поля является сопряженной для потоков J_D , J_K и J_B (рис.3).

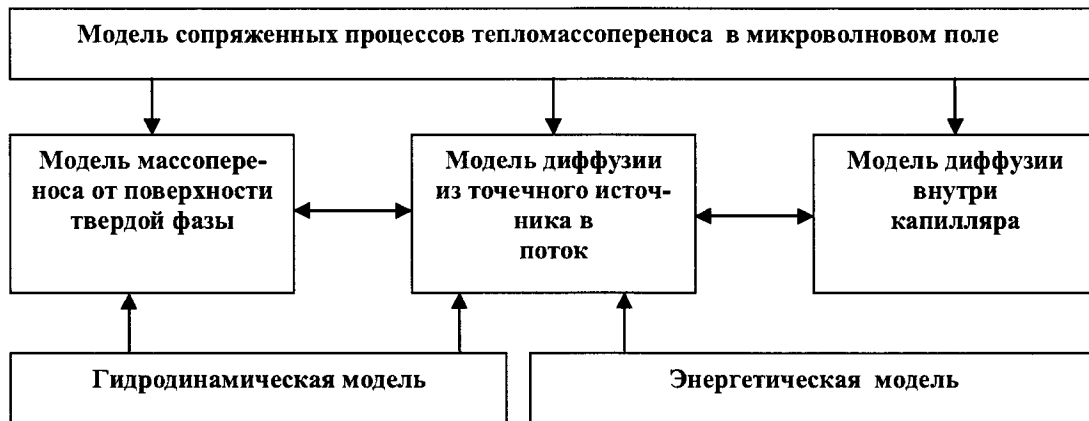
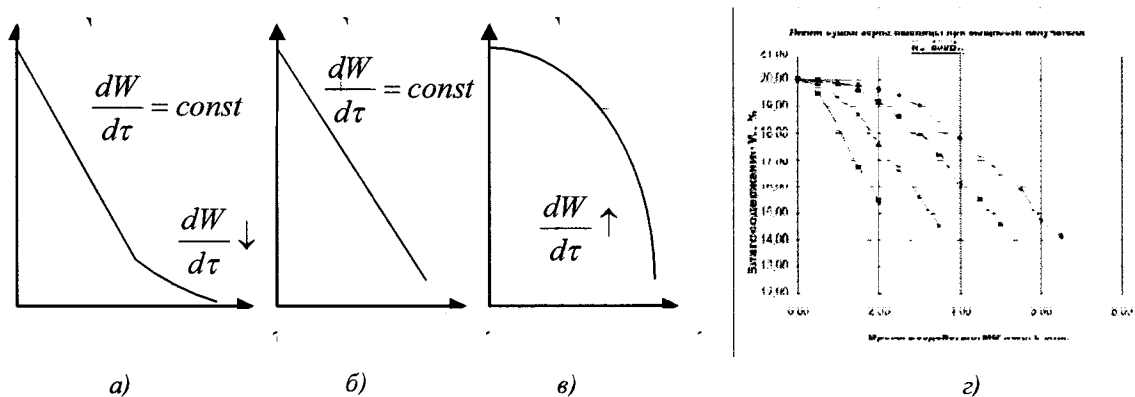


Рис. 3 – Классификация моделей тепломассопереноса в микроволновом поле.

Подробно особенности моделирования по (рис.3) рассмотрены в [2]. Бародиффузионные эффекты в капиллярнопористых системах способны качественно изменить характер линий сушки (рис.4). Это подтверждено [4, 8] экспериментально (рис.4, г).



а) – традиционная сушка, б) – ламинарная бародиффузия, в) – турбулентная бародиффузия, г) – эксперимент в микроволновой установке.

Рис. 4 – Линии удаления влаги:

Если в традиционной сушке различают периоды постоянной и убывающей скорости (рис.4, а), то в технологиях направленного энергетического действия наблюдаются режимы, в которых скорость удаления влаги может оставаться неизменной, и, даже, повышаться. В рекуперативной установке при согласовании режимных параметров комплекс $(dW/d\tau)$ остается постоянным [4]. То же самое характерно и для условий ламинарной бародиффузии, когда гидродинамический поток из объема зерновки достигает ее поверхности, что обеспечивает постоянную скорость удаления влаги. В режиме турбулентной бародиффузии наблюдается стабильный рост комплекса $(dW/d\tau)$. Объяснить этот парадокс можно тем, что под действием электромагнитного поля последовательно будет увеличиваться доля гидродинамического потока из объема зерновки, т.е. часть потока, который выходит в виде тумана. В первые минуты поверхностная влага как бы экранирует объем зерновки от электромагнитного поля, идет удаление влаги с поверхности, бародиффузионный поток минимальный. На следующем этапе по мере уменьшения количества поверхностной влаги растет доля и мощность потока из объема зерновки. Так можно объяснить характер линий удаления влаги, типичный пример которых приведен на рис.4, г [8, 9].

Для рекуперативной установки величина удельных затрат энергии снижается. Достигнуты режимы [4], в которых тепловой КПД составляет 85 %.

Режимы турбулентной бародиффузии ломают сложившиеся методы оценки энергетической эффективности процесса обезвоживания [2, 4]. Параметром оценки всегда считался тепловой КПД, который

представлялся отношением физически необходимой энергии на удаление влаги (при переводе ее в пар) к энергии, затраченной в процессе.

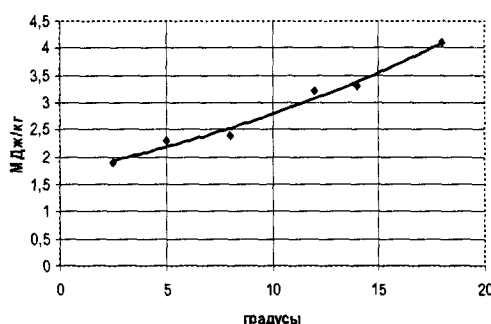


Рис. 5 – Удельные затраты энергии в установках 3 поколения

Для установок 3 поколения, реализующих бародиффузионные эффекты, достигнуты значения удельных затрат энергии 1.9 МДж на 1 кг удаленной влаги (рис.5), что ниже, чем физически необходимая энергия для перевода воды в пар [4]. Если ламинарная бародиффузия характеризуется привычными для классической задачи массопереноса понятиями — внутреннее и внешнее диффузионные сопротивления, то в режиме турбулентной диффузии нивелируются такие понятия, как пристенный пограничный слой и соответствующие диффузионные сопротивления. Если ламинарная бародиффузия интенсифицирует только внутридиффузионный массоперенос, то турбулентная бародиффузия интенсифицирует и внутри - и внешедиффузионный массоперенос. Возникает задача количественной оценки энергетической эффекти-

вности процесса удаления влаги, приемлемой и для режимов бародиффузии.

Эффект и механизм механодиффузии. Процессы экстрагирования в современных пищевых технологиях производства сахара, масел, растворимого кофе, коньячных спиртов являются ключевыми, определяющими как качество, так и экономические показатели предприятия. Однако, как правило, это достаточно трудоемкий и низкоэффективный процесс. Полученные результаты показывают, что использование принципов нанотехнологий, НЭД- технологий позволит существенно интенсифицировать процесс экстрагирования за счет эффекта комбинированного электрофизического воздействия импульсным электромагнитным полем [2, 10]. Экспериментально подтверждено, что в экстракт переходит большее количество компонентов твердой фазы, чем может быть растворено экстрагентом. Обнаружены в экстракте и совсем не растворимые компоненты [10].

Объяснить эти факты можно тем, что в условиях электромагнитного поля можно организовать специфичный поток, который содержит хорошо растворимые компоненты твердой фазы (диффузионный поток), и практически не растворимые компоненты твердой фазы, связи которой с ней слабые. Это могут быть силы Ван-дер-ваальсовы, слабые химические, механические и пр. Этот поток характеризуется механическими параметрами движущей силы, разностью давлений в капилляре и среды. Последняя может возникать в результате избирательного поглощения энергии электромагнитного источника полярными молекулами, перехода в паровую фазу наиболее летучего компонента, повышения давления в глубине капилляра. В результате появляется мощная движущая сила, гидравлический потенциал для потока из капилляра. Это сугубо механический поток, мощность которого определяется как самой разностью давлений, так и динамикой изменения давлений. Такой поток можно инициировать, им можно управлять параметрами электромагнитного поля.

Представляется, что в общем, мы имеем дело с новым явлением, новым эффектом, название которому можно дать «механодиффузионный эффект массопереноса при безградиентном волновом подводе энергии к полярным молекулам электромагнитным полем».

Число энергетического действия. Очевидно, что прикладные проблемы из-за специфики сушки при электромагнитном подводе энергии практически не изучены. Однако успешное моделирование процессов сушки с ЭМП может дать мощный импульс широкого внедрения перспективной техники в пищевые технологии. Для учета влияния электромагнитного поля при сушке сырья автором [2] предложено число энергетического действия (число Бурдо), которое выражается отношением энергии, затраченной на организацию процесса (Q_H), к той энергии, которая физически необходима для перевода в пар всей удаляемой из сырья влаги (Q_T). Из теплового баланса теоретический расход энергии пропорционален массовому расходу удаляемой влаги (M) и удельной теплоте фазового перехода. Это число справедливо и для традиционных сушилок, и для установок 2 и 3 поколений. Для установок с ЭМП число энергетического действия будет иметь вид

$$Bu = (Q_H/Q_T) = N (Mr)^{-1} \quad (3)$$

Соотношение между энергией излучения и той энергией, которая необходима для аналогичных процессов в традиционных технологиях определяет как энергетическую эффективность оборудования, так и режим массопереноса. До определенных значений числа Bu имеют место ламинарные режимы движения жидкости в капиллярных каналах твердой фазы. Число Bu может показывать условия перехода к более интенсивному массопереносу, который логично назвать режимом турбулентной бародиффузией.

Это число удачно обобщило базы экспериментальных данных в процессах обезвоживания и экстрагирования. Представляется, что число Bu может ответственно характеризовать энергетическую специфику всех задач, применяемых НЭД – технологии. Оно позволяет сравнивать энергетические показатели сушилок разных поколений.

Таблица 1 – Сравнение энергетических показателей сушилок разных поколений

Принцип удаления влаги	МДж/кг удаленной влаги	Тепловой КПД, %	Число Бурдо
Базовые конвективные	6 - 8	0,3 - 0,38	2,6 – 3,5
Зерносушилки			
- базовые 1 поколения	4,26 – 6,3	0,36 – 0,5	1,85 – 2,7
- модернизированные 1 поколения	3,8 - 5,1	0,45 – 0,6	1,67 - 2,22
- блочные 2 поколения	3,54	0,65	1,54
- рекуперативные 2 поколения	2,7 - 2,88	0,8 – 0,85	1,18 - 1,25
- 3 поколения (достигнутый результат)	1,29	-	0,56
- 3 поколения (ожидаемый результат)	0,2	-	0,09

Результаты табл.1 позволяют сделать 2 вывода. Во-первых, число Bu логично оценивает энергетику сушилок, реализующих разные принципы обезвоживания. Во-вторых, число Bu иллюстрирует перспективу установок 3 поколения.

Эффективность извлечения влаги из твердой фазы зависит от согласования продолжительности и мощности импульсов ЭМП. При малой продолжительности может не успеть сформироваться поток влаги из нано- и микрокапилляров. При большой продолжительности и мощности возможен нежелательный перегрев твердой фазы. При более тонкой организации энергоподвода целесообразно менять параметры ЭМП во времени в соответствии с мгновенными значениями диэлектрических характеристик твердой фазы (наличия и количества в каналах влаги). Мощность электрофизического воздействия следует согласовывать и с диаметрами каналов – в более мелких каналах требуется больший перепад давлений для возникновения бародиффузионного потока [11].

Выводы. Локальное действие на наномасштабные элементы пищевого сырья позволяют дать принципиально новые подходы организации процессов в АПК. Развивается новое научное направление в пищевых нанотехнологиях – управление процессами переноса на границе фаз нанометрических пищевых структур [4]. Инструментом такого управления может стать энергетическое воздействие. Такое направление названо «НЭД - технологии», т.е. технологии направленного (селективного) энергетического действия на элементы сырья. Подраздел направления – наноэнерготехнологии, технологии адресной доставки энергии к наномасштабным элементам пищевого сырья.

Мощным средством инициирования возникновения нанокинетики является импульсное электромагнитное поле. Именно в условиях ЭМП представляется возможность организовать направленный, локальный подвод энергии к полярным молекулам пищевого сырья, т.е. реализовать НЭД- технологии.

Литература

1. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244с.
2. Бурдо О.Г., Пищевые наноэнерготехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
3. Рынок нано: от нанотехнологий к нанопродуктам /Г.Л.Азоев [и др.]; под ред. Г.Л.Азоева.- М.: БИНОМ, 2011. - 319с
4. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368с.
5. Потапов В.А., Якушенко Е.Н. Повышение энергоэффективности сушки виноградных выжимок в массообменном модуле с кондуктивным подводом теплоты //Наук. праці Од. націон. акад. харчових технологій. – Одеса: 2013. – Вип.43, Т2. – с.179-184..
6. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях //Инженерно-физический журнал. Минск, т.78, № 1.-2005. - С.88-93.
7. Burdo O.G. Nanoscale effects in food-production technologies // Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2005.- Vol.78, Issue 1.- P.90-96.
8. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Электромагнитные технологии обезвоживания сырья /Problemele energeticii regionale, Chisinau, №1 (18), 2012.- pp.69- 79.
9. Бурдо О.Г. Механо-диффузионный эффект массопереноса при экстрагировании в электромагнитном поле //Пищевая наука и технология. - 2012. - № 4(21) - С.53-57.

10. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Ружицкая Н.В., Макиевская Т.Л. Процессы переработки кофейного шлама. – Киев: ЭнтерПринт, 2014.- 228 с.
11. Бурдо О.Г. Нанотехнологии. Флагманские, перспективные и фундаментальные проекты в АПК //Наук. праці Од. націон. акад. харчових технологій. – Одеса: 2006. – Вип.28, Т2. – с.242-251.

УДК 663.938.011:537-962

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОФЕПРОДУКТОВ

Терзиев С.Г., канд. техн. наук
Одесская национальная академия пищевых технологий

Приведены результаты энергетического и экологического мониторинга в пищекопцентратном производстве. Формулируются научные гипотезы путей решения задач. Предложены инновационные проекты совершенствования теплотехнологий пищевых концентратов. Анализируются перспективы электромагнитных принципов сушки и экстрагирования. Приведены результаты производственных испытаний системы тепломассоутилизации, микроволнового экстрактора кофе и масла кофе. Обсуждается линия переработки шлама и производства топливных пеллет.

The results of energy and ecological monitoring in production of food concentrates are shown. Scientific hypotheses of problems solutions are formulated. Innovative projects of improving thermotechnologies of food concentrates are proposed. The prospects of electromagnetic principles of drying and extraction are analyzed. The results of the production test of heat-mass utilization system, microwave extractor of coffee oil and coffee are shown. The line of coffee sludge processing and fuel pellets production are discussed.

Ключевые слова: теплотехнология, кофепродукты, моделирование, переработка отходов, микроволновой экстрактор, тепломассоутилизатор.

Введение. Промышленное производство пищевых концентратов (ПК) началось в канун первой мировой войны. На территории нашей страны предприятия, выпускающие ПК, появились в 1936г. Специфика продукции, ее ориентация на нужды армии и флота определили требования к ПК: быстрота приготовления, продолжительные сроки хранения и высокое качество. Именно эти качества ПК привлекают интерес широкого круга потребителей, и сейчас большинство жителей планеты все чаще обращаются к

продуктам пищекоцентрированной отрасли. Быстро расширяется ассортимент ПК и их рынки. Самым востребованным продуктом ПК в мире стал порошок растворимого кофе. Численность работников кофейной индустрии на планете достигло 25 млн. человек.

В последние годы в Украине стремительно растут продажи растворимого кофе. Конкурировать с ведущими производителями кофепродуктов украинским предприятиям сложно: дорогое импортное сырье, выросшие до мирового уровня цены на энергоносители. Традиционные технологии ключевых операций производства – экстрагирование и сушка – отличаются высокой энергоемкостью [1, 2]. Поскольку влиять на стоимость сырья украинские производители кофепродуктов не могут, то есть два конкурентных направлений. Первое – это инновационные технологии, направленные на совершенствование процессов сушки и экстрагирования. Второе – инновационные технологии глубокой переработки сырья, перевод производства на принципы экоиндустрии. Первый этап работы – это энергетические исследования, определение тепловых балансов, расчет потоков энергии.

Энергетический мониторинг производства. Инструментом системного анализа теплотехнологического комплекса являлась методология энергетического менеджмента. Ключевым параметром, по которому проводились исследования и оптимизация теплотехнологической системы, были удельные затраты энергии на единицу продукции (j , Дж/кг). Установлены варианты минимизации параметра j , который выражает суммарную теплотехническую эффективность системы «генератор тепловой энергии – транспортная система – потребитель энергии». В основе анализа использована оригинальная методика расчетно-экспериментального определения тепловых потерь. Сформированы структурные модели теплотехнологии ПК. Выполнена декомпозиция технологической линии «парогенератор – варочный аппарат – ленточная сушилка» (производство вторых блюд) и линии «обжарочный аппарат – экстрактор – вакуум выпарной аппарат – распылительная сушилка» (производство растворимого кофе). Определены (рис.1) источники тепловых и сырьевых выбросов (отходы в виде шлама из экстракторов и мелкодисперсного порошка кофе с отработавшим сушильным агентом). На рис.1 приняты обозначения: Пт – потери энергии; От – отопление; Оа – обжарочный аппарат; Ва – варочный аппарат; Рс – распылительная сушилка; Лс – ленточная сушилка; Пр – продукт; Эн – энергоноситель; Кр – корпус.

Основным энергоносителем предприятия является природный газ, удельные расходы которого составляют 75,56 МДж на 1 кг растворимого кофе и водяной пар, удельные расходы которого составляют 6,83 МДж на 1 кг пищевых концентратов. На основе выполненного энергетического аудита предложены пути повышения эффективности использования природного газа в технологиях [2, 3].

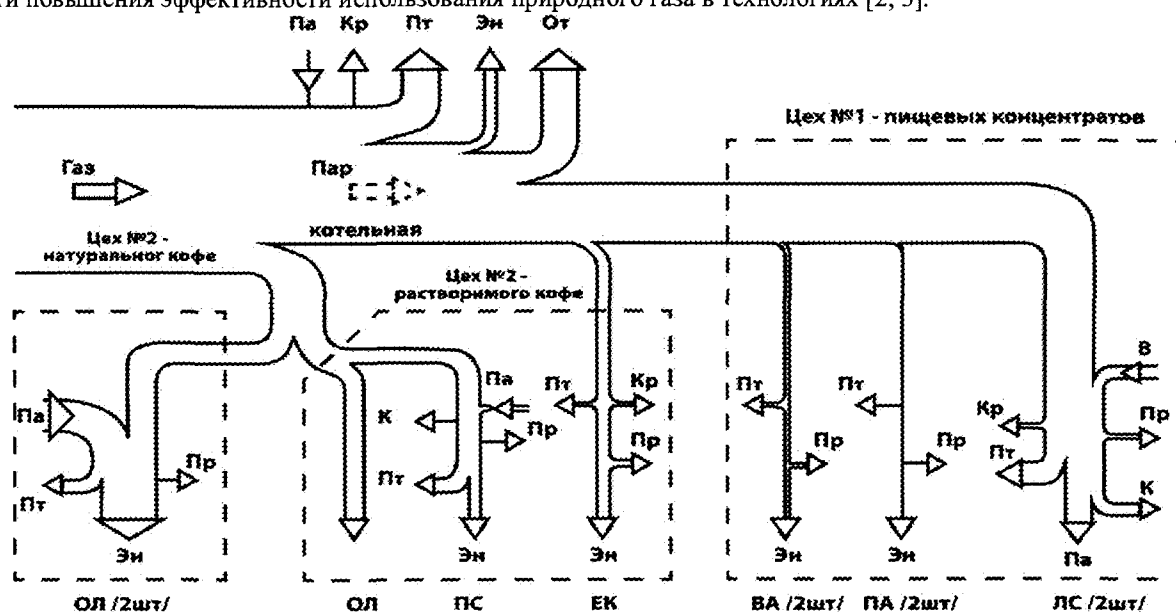


Рис. 1 – Энергетические потоки производства

1. Серьезные резервы существенного снижения расхода энергетических ресурсов заключаются в организационных мероприятиях. Только соблюдение нормативных режимов работы оборудования даст сокращение расхода энергетических ресурсов от 18 % (в котельной) до 50% (на распылительной сушилке).

2. Вторым этапом совершенствования теплотехнологий считаются технические мероприятия по утилизации тепловых выбросов (на РС, ЛС, Э, обжарочном аппарате, в котельной), монтажу тепловой изоляции и т.п.

3. Третьим этапом модернизации теплотехнологий являются внедрения инновационных проектов эффективных приемов подвода энергии в технологиях сушки и экстрагирования.

Экологический мониторинг производства. Серьезную нагрузку на окружающую среду оказывает оборудование по производству растворимого кофе. Загрязнителями атмосферы являются составляющие потока отработавшего теплоносителя: влага и пыль кофе, а также, теплота. Источниками загрязнений литосферы является кофейный шлам. На 1кг готового продукта образуется 6...8 кг кофейного шлама. Так, при производстве растворимого кофе основной продукт составляет 20...33 % от массы сырых зерен, 10...15 % приходится на влагу, 57...63 % составляет кофейный шлам. Отходы производства - кофейные шламы, не утилизируются, создают экологически опасную ситуацию, загрязняя окружающую среду. Вместе с тем, эти отходы содержат до 4 % экстрактивных веществ, до 22 % масел и значительное количество других ценных компонентов, извлечение которых имеет коммерческую целесообразность. Наиболее ценными компонентами шлама, пригодными для дальнейшей переработки являются: кофейное масло (7...12 %), целлюлоза и лигнин (60...75 %), смесь вкусоароматических веществ (3...5 %), белков (5...7 %). Техника выгрузки предполагает получение на выходе жидкой и твердой частей шлама. Несмотря на серьезные экологические проблемы, которые связаны со спецификой кофейного шлама, и на потери в традиционных технологиях с ним ценных веществ, практических примеров его переработки в Украине нет. Выбросы теплоносителя из сушильного оборудования содержат 0,055г пыли порошка кофе в 1 м³ теплоносителя, а их температура составляет 105 °С. В результате за год с одной сушильной установки теряется: 8200 ГДж тепловой энергии и 4560 кг готового продукта.

Предложены системы экологической защиты, которые направлены на улавливание из аэрозольных выбросов распылительной сушилки теплоты, влаги и пыли пищевого продукта и глубокой переработки шлама. Обоснованы пути совершенствования теплотехнологий производства [4].

Формирование инновационных проектов. На распылительной сушилке целесообразно установить систему комплексной утилизации теплоты и пыли пищевого продукта (СТМУ) [5, 6, 7]. В технологии сушки пищевых концентратов (ТПК) ленточную сушилку конвективного типа можно заменить на рекуперативную со шнековым вращающимся термосифоном (ВТС). Особые перспективы можно ожидать от внедрения современных принципов эффективного подвода энергии, использования электромагнитных генераторов (ЭМГ). Генераторы инфракрасного диапазона (ИКГ) представляют интерес в ленточной сушилке, как дополнительные или самостоятельные регистры. Генераторы микроволнового диапазона (МВГ) позволяют создать эффективные экстракторы для получения жидких концентратов кофе (ЭК) и выделения кофейного масла (ЭМ). Решать проблемы энергообеспечения предприятия можно за счет альтернативных источников энергии (АИЭ). Для этого следует установить линию переработки шлама (ЛПШ) на агропеллеты (АП), которые могут полностью заменить природный газ в системе отопления (СО) и в распылительной сушилке (РС). Предложения иллюстрируются схемой (рис.2).



Рис. 2 – Классификация инновационных проектов.

В основе предлагаемых инновационных проектов лежат исследования методом энергетического менеджмента, которые определили объекты модернизации, и ряд научно-технических гипотез, которые обосновали пути реализации проектов [4, 7].

Результаты реализации инновационных проектов. Порошок кофе получают в производительной распылительной сушилке. Передовые сушильные теплотехнологии используют теплоту отработавшего теплоносителя для предварительного нагрева воздуха, поступающего в калорифер сушилки. В качестве такого теплоутилизатора предпочтение отдают рекуператорам на тепловых трубах [7]. Однако наличие в отработавшем сушильном агенте пыли пищевого продукта не давало возможности применить мировой опыт. Найдено оригинальное решение подключить к решению проблемы водяной пар, который всегда есть в отработавшем теплоносителе сушилки [6]. В основе 2 научно-технических гипотезы.

1. Согласование компоновочных характеристик аппарата (числа рядов и шага ТС) и параметров паропылегазового теплоносителя (температуры, содержания пыли и влаги, его расхода) при нисходящем движении потока воздуха и восходящем теплоносителя обеспечивают работу рекуператора в режиме «самоочищения» теплопередающей поверхности. При этом, на верхних рядах ТС возникают условия парциальной конденсации водяных паров из теплоносителя, конденсат взаимодействует с водорастворимой пылью продукта, осевшей в межреберном пространстве ТС. При увлажнении пыли адгезионно-когезионные силы сначала растут, достигая максимума, а затем уменьшаются и при условии, когда определяющими станут силы гравитации, слой осадений перейдет в состояние текучести.

2. Процесс образования слоя пыли продукта из паропылегазового потока теплоносителя на поверхности ТС определяется условиями предельного равновесия массопереноса, а пористая структура слоя может способствовать капиллярной и поверхностной (на границе ТС – слой продукта) конденсации водяных паров и быстрому растворению пыли.

Гипотезы доказаны результатами производственных испытаний ТМУ [8, 9]. Разработанный «тепло-массоутилизатор» способен в комплексе решать проблемы экологии, ресурсо- и энергоэффективности. По сути это современный аппарат экоиндустрии не только пищевых концентратных, но и сахарных, молочных, консервных и пр. технологий.

Ощутимая эффективность получена от внедрения ТМУ в линию растворимого кофе (рис.3).

Комплекс энергетических и экологических проблем характерен для экстракционного отделения [4]. Высокий уровень термического воздействия на сырье определяет основные недостатки производства растворимого кофе: значительная энергоемкость оборудования и длительность технологического процесса (7...8 ч) и использование высокого давления в экстракторах (0,3...1,5 МПа).

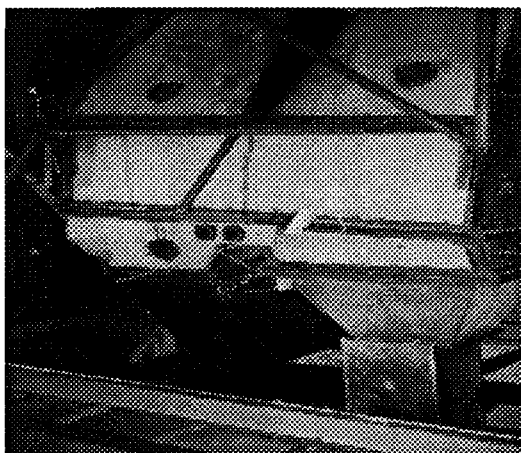


Рис. 3 – Внедрение тепломассоутилизатора

Эксплуатируется в технологии растворимого кофе предприятия «Энни Фудз» с 1999 г. Снижает расход топлива на 20-25 %. Извлекает из газовых выбросов от 40 до 99 % пыли продукта. Состоит из 200 термосифонов. Тепловая мощность модуля 0,1...0,5 МВт. Габаритные размеры: 1650х2000х600. Конструкция аппарата, состоящего из отдельных высокоэффективных модулей – термосифонов, отличается простотой монтажа и эксплуатации. Разработан типоразмерный ряд воздухоподогревателей на термосифонах [7], который может использоваться в различных теплотехнологиях АПК. Срок окупаемости ТМУ в пределах 1 года.

Методы математического моделирования рассмотренных выше объектов предусматривали детерминированные подходы. Все задачи специфичны, отличаются физическими представлениями. Поэтому, их решения находились в соответствии с особенностями и целью моделирования. Схема моделирования соблюдалась общей:

«переход от физической реальности к физической модели – формирование системы уравнений с граничными условиями – упрощение и поиск путей ее решения». Составлялась система дифференциальных уравнений, которая учитывала все движущие силы комбинированных процессов переноса, обосновывается переход к явной математической модели в обобщенных переменных. Используются теория подобия и метод «анализа размерностей».

Новыми эффективными технологиями экстрагирования и переработки сырья считаются объемные безградиентные принципы подвода энергии к элементам растительного сырья. Интенсификация процессов переноса в таких системах достигается в несколько раз и, иногда, и на порядки [10 – 14].

Именно эти принципы адресной доставки энергии при переработке пищевого сырья применяются в работе для совершенствования теплотехнологии растворимого кофе. В традиционные промышленные технологии остаток полнокачественных экстрактивных веществ в кофейном шламе (составляет 10...15 % от общего содержания водорастворимых веществ в сырье) содержится в микро- и нанокapиллярах зерен и в условиях стесненности поэтому их не удастся удалить промышленными технологиями. Возможность перехода на принципиально новые технологии экстрагирования защищается следующей научной гипотезой:

- применение в процессе экстрагирования из кофейных продуктов электромагнитного подвода энергии позволит организовать процесс при эффективном противоточном движении сырья и экстрагента, в условиях атмосферного давления, при извлечении из капиллярной структуры зерен остатков экстрактивных веществ за счет специфического гидродинамического потока, возникающего при взаимодействии импульсного микроволнового поля с полярными молекулами жидкости в капиллярах сырья.

Разработанный способ получения кофейных экстрактов под воздействием МВ поля существенно интенсифицирует внутренние процессы массообмена, позволяет сократить потери вкусоароматических веществ в экстракте, улучшить качество готового продукта, снизить потери целевых компонентов, снизить величину затрат энергии, перевести экстрактор на уровень рабочих температур до 100 °С и атмосферных давлений. Компьютерная программа расчета микроволнового экстрактора, основанная на результатах экспериментального моделирования кинетики взаимодействия кофейных продуктов и воды, может быть применена для проектирования подобных систем в широком диапазоне изменения параметров. Обоснованный типоразмерный ряд МВ экстракторов непрерывного действия рекомендуется к внедрению. Опытнo-промышленный образец МВ экстрактора непрерывного действия обеспечивает интенсификацию процесса и позволяет увеличить выход готовой продукции за счет дополнительного извлечения водорастворимых веществ из кофейного шлама на 10 – 15 %, таким образом, сокращая нормы расхода кофе – сырья. МВ экстрактор и рабочие режимы для экстрагирования кофейного сырья переданы для внедрения на ПАО «Енни Фудз» г. Одесса. Корпус выполнен из каскада резонаторных камер с 5 магнетронами. Блоки кассет с сырьем перемещаются с помощью домкрата через шлюзовые каналы. Рабочий объем, 180л. Производительность по сырью 24кг/ч [4, 11].

Габаритные размеры (д/ш/в): 0,52/0,68/2,05м.

Приведены результаты анализа и дегустации принципиально новых образцы неэнергоемких концентратов жидкого кофе, которые были получены в микроволновой вакуум-выпарной установке. Температура процесса составляла 35...100 °С, а концентрация сухих веществ - 54 – 70 %.

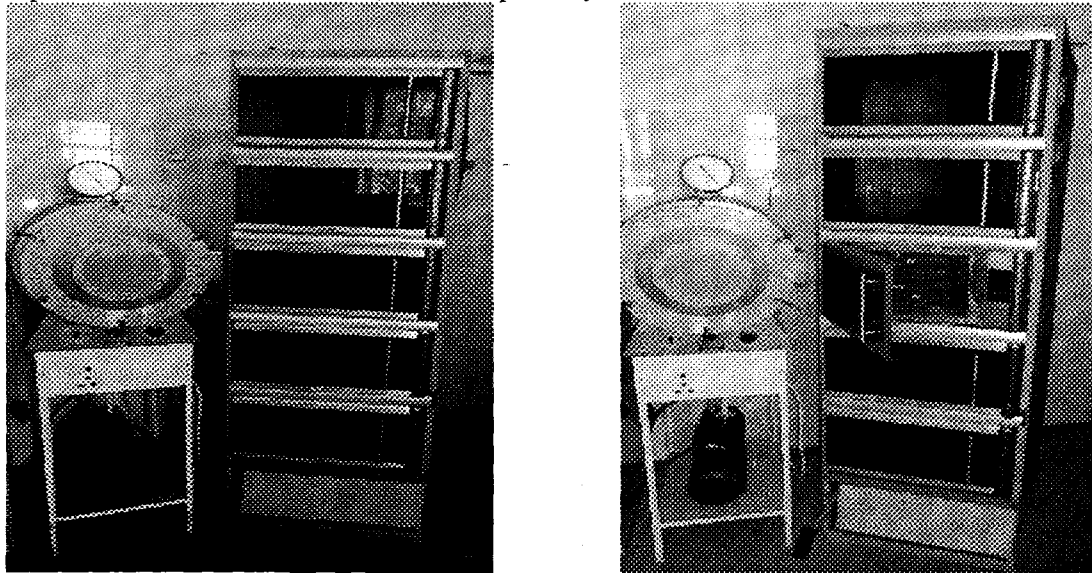


Рис.3 – Микроволновой экстрактор кофе

На основе полученных концентратов купажируются новые продукты: «кофе с сахаром», «кофе с коньяком», «кофе с молоком», «кофе с сахаром и коньяком». Образцы получили высокую оценку при дегустации [15].

Экологические регламентации требуют глубокой переработки кофейного шлама. Кофейный шлам из диффузионных батарей выгружается с влажностью 70...80 %. Остатки кофейного экстракта, разбавлен-

ные конденсатом до концентрации сухих веществ 0,8...1,2 %, сосредоточены в жидкой части шлама, и имеют полноценный химический состав. С кофейным шламом теряется около 5 % водорастворимых веществ. Это составляет до 16 % от их общего содержания в обжаренном кофе. При этом 3 % приходится на потери с жидкой частью шлама и 2 % - на потери с твердой фракцией. Применение инновационных технологий дополнительного извлечения водорастворимых компонентов из шлама в микроволновом экстракторе позволяет на вход в диффузионные батареи подавать не воду, а экстракт концентрации до 2...4 %. Твердая часть (истощенный шлам) идет на сушку (рис.4).

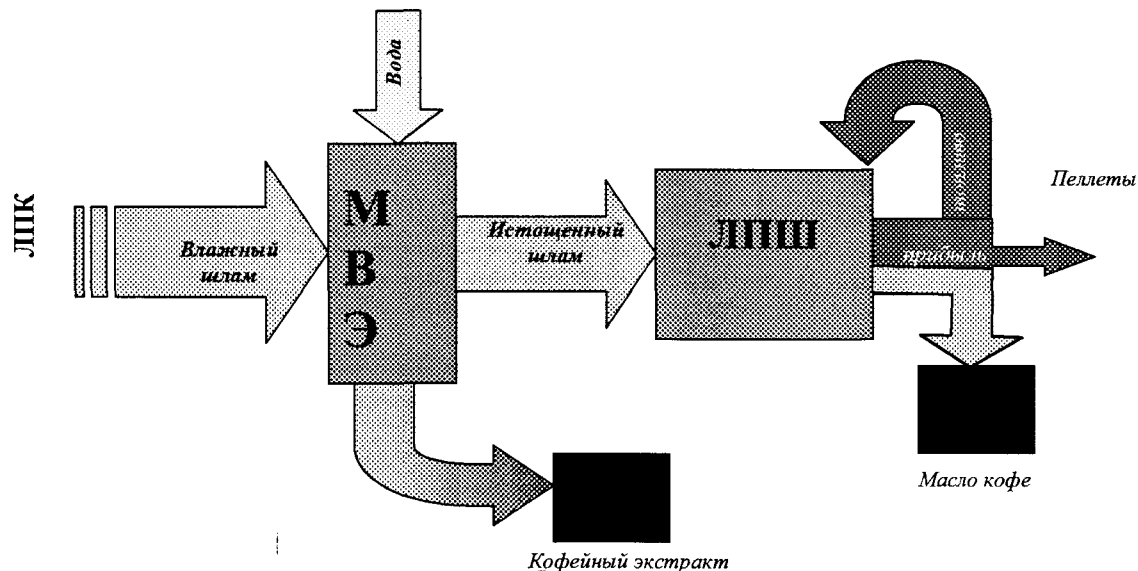


Рис. 4 – Линия переработки кофейного шлама

Далее истощенное сырье идет на линию переработки шлама для получения масла кофе. Это масло (аналог масло какао) имеет серьезные перспективы. Обезжиренный шлам направляется на участок производства топливных пеллет линии переработки шлама.

Проведены испытания опытного образца ленточной ИК- сушилки шлама. Установка состоит из 3 модулей, мощность излучателей каждого модуля плавно регулируется в пределах 30 – 100 %. Установлены режимы, при которых энергозатраты составляли 3,1...3,2 МДж на 1кг удаленной влаги [16].

Применение бародиффузионных принципов при организации процессов экстрагирования масла из шлама кофе должно обеспечить больший выход целевого компонента при снижении затрат энергии, снижении времени процесса и повышении качества готового продукта. Плавное повышение давления выдержка при максимальном давлении и последующий резкий сброс давления приведет к частичному либо полному разрушению клеточных оболочек и активации структурированных белоксодержащих отходов переработки кофейного сырья [17]. Активация обезжиренного шлама позволяет получить связующий компонент и изготавливать на основе только шлама строительные материалы, кирпичи. Последовательная обработка шлама в сушилке, пресс – грануляторе даст возможность производства агропеллет. Это новый способ деструкции растительного сырья, предложенный на кафедре процессов, аппаратов и энергетического менеджмента ОНАПТ. В основе технической идеи способа – реакция оболочки клетки при последовательном подводе к ней энергии, выдержке и резкого сброса давления на третьем этапе. В основе анализа непрерывно – гетерогенная модель системы.

Выводы. В мире ужесточаются регламентации по загрязнению окружающей среды отходами производства. Внедрение предложенных технологий позволит полностью снять вопросы экологической безопасности пищевого производства в технологиях растворимого кофе. Шлам становится ценным дополнительным источником для увеличения выхода готового продукта, для производства перспективного кофейного масла. Пеллеты из кофейного шлама снизят энергетическую зависимость предприятия от природного газа и могут быть источником дохода на рынках агропеллет.

Разработанный способ получения кофейного масла из шлама с использованием МВ поля позволяет получать рафинированное масло и кофеоль при снижении потерь целевых компонентов и уменьшении удельных затрат энергии. Определены пути переработки кофейного шлама (например, для производства пеллет), предложен проект линии по утилизации шлама. Дана оценка бизнесперспектив технологий ути-

лизации. Продукты переработки кофейного шлама – это новые виды вкусоароматических и функциональных концентратов (препаратов), добавок и материалов для различных отраслей экономики, топливных элементов, удобрения и пр.

Инновационными являются и сами принципы переработки кофейного шлама – это использование комбинированных процессов, нанотехнологий. Возможности новых принципов получения концентратов подтверждены комплексом исследовательских работ. Изготовлены экспериментальные образцы оборудования, на котором получены концентраты кофе, масел, и других вкусо-ароматических добавок.

Общий вывод по проведенным разработкам заключается в том, что микроволновые технологии – новый и выгодно отличающийся метод производства кофепродуктов.

Коммерческая привлекательность проектов определяется за счет:

- дополнительного извлечения растворимых водой экстрактивных веществ, что повышает выход в экстракт на 10...12 %;

- дорогого и качественного масла кофе (рафинированного и кофеоля), спрос на которое на рынке повышается;

- топливных элементов – пеллет, энергия которых может использоваться на предприятии;

- аппарата для возврата из отработавшего сушильного агента в технологию теплоты и пыли кофе.

Таким образом, из экологически проблемных отходов предприятием может быть получена ощутимая прибыль.

Литература

1. Терзиев С.Г. Энергетический мониторинг пищекокцентратного производства // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2008. – Вип. 32. – С. 300–333
2. Терзиев С.Г. Системный анализ потоков сырья и энергетических ресурсов в технологиях пищевых концентратов / Терзиев С.Г. // Харчова наука і технологія. – 2011. – №1(14). – С. 98-102.
3. Терзиев С.Г. Совершенствование энерготехнологий при производстве пищевых концентратов / Терзиев С.Г., Ружицкая Н.В., Борщ А.А., // Щоквартальний науково-практичний журнал «ІТЕ» Національний технічний університет «ХПІ», – Харків, 2014. – №4. – С.138-142
4. Процессы переработки кофейного шлама / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Ружицкая Н.В., Макиевская Т.Л. – К.: ЭнтерПринт, 2014. – 228с.
5. Бурдо О.Г. Стратегія розвитку та перспективи впровадження високих енерготехнологій в АПК / Бурдо О.Г., Терзієв С.Г. // Наукові праці ОДАХТ. – 1996. – Вип. 16. – С. 244 – 245
6. Бурдо О.Г. Терзієв С.Г., Перетяка С.М. Спосіб утилізації тепла та пилу продукту при сушінні продукту Патент України № 26470. Приоритет від 16.03.93. Опубл. 11.10.99. Бюл. №6.
7. Инновационные теплотехнологии АПК на основе тепловых труб / [О.Г. Бурдо, Г.Ф. Смирнов, С.Г. Терзиев, А.В. Зыков]. – Одесса: «ИНВАЦ», 2014. – 376 с.
8. Бурдо О.Г. Тепломассоперенос в утилизаторах теплоты паропылегазовых выбросов пищевых производств / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Перетяка С.Н. // III Минский междунар. Форум по тепломассообмену, 20 – 24 мая 1996г.: Т. X, Ч. 1. – Минск, 1996. – 173 – 177. |
9. Терзиев С.Г. Моделирование задач тепломассопереноса при взаимодействии дисперсных компонентов в аэрозольном потоке // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2006. – Вип. 28. – Т.2. – С. 182-186.
10. Наномасштабные подходы при переработке пищевого сырья / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В., Макиевская Т.Л. // Высокие технологии, образование, промышленность. Сборник статей одиннадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности», – Санкт-Петербург, «Издательство политехнического университета», 2011– Т.3. – С. 129 – 132.
11. Использование микроволновых технологий в процессах комплексной переработки шлама кофе / Терзиев С.Г., Ружицкая Н.В., Макиевская Т.Л., Бурдо О.Г. // Харчова наука і технологія. – 2014. – №3(28) – С. 85–88.
12. Моделирование процессов обезвоживания пищевого сырья в электромагнитном поле / Бурдо О.Г., Терзієв С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – Воронеж, 2013. – № 3 (57) – С. 62 – 65
13. Пути совершенствования теплотехнологий сушки в АПК / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Зыков А.В., Безбах Н.В. Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов): 1-я Международная конференция: Труды. – Т.4. – Москва, 2002 – С. 153 – 156
14. Электромагнитные технологии обезвоживания сырья / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. // Научный информационно-аналитический инженерный журнал «Problemele energetici regionale (Проблемы региональной энергетики)» – Кишинев, 2012г. – №2 (19) – С.69–79

15. Неэнергоёмкие пищевые добавки, натуральные красители и ароматизаторы / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Ружицкая Н.В., Харенко Д.А. // Наукові праці ОНАХТ, – Одеса, 2014. – Вип. 45, Т.2. – С. 221 – 224
16. Кінетика ІЧ-сушіння шлему кави / Бурдо О.Г., Терзієв С.Г., Ружицька Н.В., Борщ А.А. // Харчова наука і технологія. – 2011. – №4(17) – С. 96–99.
17. Терзиев С.Г. Математическое моделирование процессов переработки структурированных отходов в пищекопцентратном производстве / Терзиев С.Г. // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2010. – Вип. 37. – С.132-136

УДК 515.124.4:51-73

РАЗМЕРНОСТИ: ГЕНЕЗИС ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Гергега А.Н., д-р техн. наук, профессор
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

В обзоре описаны некоторые универсальные и специальные размерности, вошедшие в математический аппарат теоретической физики в двадцатом столетии.

In the review describes some of the universal and special dimensions included in the mathematical formalism of theoretical physics in the twentieth century.

Ключевые слова: покрытия, адекватность меры, размерность Хаусдорфа-Безиковича, энтропия меры, эффективная размерность.

1. Введение

Теория размерности, основы которой, как известно, были заложены в работах А. Пуанкаре, А.Л. Лебега и Л. Брауэра [1-3], опубликованных в 1911-13 годах, открыла «доступ к изучению ряда интересных свойств точечных множеств, к построению обширной теории...» [4, 5]. Понятие размерности оказалось полезным и удобным концептом и в теоретической физике.

В физике сформировались две основные группы задач, в которых размерность стала реальным инструментом получения и анализа решений. Первая – это задачи стохастической динамики, в частности, проблемы турбулентности. В этих задачах размерности являются доступными для измерения и структурно устойчивыми характеристиками системы, связанными, в частности, с показателями Ляпунова; позволяют провести классификацию странных аттракторов и связанного с ними хаотического поведения [6].

Вторая группа – задачи перколяционной теории: раздела статистической физики, который на протяжении полувека изучает критические явления [6, 7]. Перколяционная теория адекватно описывает особенности возникновения и эволюции, а также свойства связанных областей в системах, в которых имеет место геометрический фазовый переход. Она нашла применение в широком круге научно-технических задач: исследовании белковых структур, пористых тел, создании фильтров, изучении легированных полупроводников, при борьбе с эпидемиями, в исследованиях процессов полимеризации, при создании композиционных материалов, изучении мировоззренческих вопросов и многих других. При этом для критических показателей физических величин, описывающих процессы и явления, как правило, можно указать множество, с размерностью которого этот показатель связан. В свою очередь, исследование структуры этих множеств много даёт для понимания критического поведения системы и соотношений между показателями, позволяет проследить связь между поведением системы в промежуточной асимптотике и её геометрией [6].

Перколяционная теория известна также как раздел теории вероятностей, имеющий собственные приложения в естественных и инженерных науках [8 – 11].

В математических и физических исследованиях используется большое количество размерностей, и в конкретном исследовании всегда встаёт вопрос выбора, который обусловлен содержанием задачи. Размерности, представленные в обзоре, соотносятся с совершенно разными понятиями, в частности, имеют отношение и к описанным группам задач (в первую очередь, к перколяционной теории), и к топологическим исследованиям.

Далее в тексте, как и во всех физических приложениях, размерности определяются как показатель степени в выражениях типа $a \sim b^c$.

2. Геометрическая и физическая размерности

Размерность физической величины определяет её связь с величинами, положенными в основу системы единиц измерения, т. е. устанавливает соотношение масштабов данной и основных единиц измерения [12]. Из такого определения следует, что физические величины, в отличие от геометрических, изменяются не только при преобразованиях координат, но и при модификации системы физических величин. Это значит, что при определённом выборе основных единиц каждому физическому объекту соответствует один и только один геометрический объект – образ физического объекта, который приобретает множитель $a^{\alpha} \beta^{\beta} c^{\gamma} \dots l^{\lambda} m^{\mu} n^{\nu}$, если вводится другое множество допустимых основных единиц; этот множитель называется размерностью геометрического образа, или абсолютной размерностью физического объекта. Абсолютная размерность определена относительно аффинной группы, если мы работаем с прямолинейными координатами n -мерного евклидова пространства. Эта размерность не является размерностью, с которой работают физики [13].

Если компоненты физического объекта относительно локальной декартовой системы координат, основанной на единице длины, приобретают при изменении основных единиц множитель $a^{\alpha 1} \beta^{\beta 1} c^{\gamma 1} \dots l^{\lambda 1} m^{\mu 1} n^{\nu 1}$, то его называют относительной размерностью, или просто размерностью, физического объекта. Это та размерность, которая используется в физике.

Таким образом, различие между абсолютной (геометрической) и относительной (физической) размерностью физического объекта обусловлено тем, что общая система координат не связана с единицей длины, а локальная декартова изменяется при введении другой единицы. Следовательно, соотношение между ними зависит только от закона трансформации объекта при преобразовании координат [13].

3. Размерность пространства. Топологическая размерность

Если рассматривать геометрические объекты как множества точек евклидова пространства R^E , то понятие топологической размерности можно ввести по рекуррентной схеме, предложенной А. Пуанкаре [1].

Положим размерность любого конечного или счётного множества точек равным нулю; размерность связного множества будем считать равной $d + 1$, если оно может быть разрезано на две несвязанные части исключением из него как минимум d -мерного множества точек, т. е. проведением d -мерного разреза. При таком определении, если положить размерность точки равной нулю, то топологическая размерность линии будет равна единице, плоскости и сферы – двум, шара – трём и т. д.

Из определения видно, что топологическая размерность может быть только целым числом, и совпадает с интуитивным представлением о минимальном количестве переменных, которые нужно задать для определения положения точки на объекте [14]. В 1902 году в книге «Наука и гипотеза» [15] А. Пуанкаре писал, что «размерность пространства – это минимальное число параметров, которые необходимы, чтобы отличать точки пространства друг от друга»; полное зрительное пространство «имеет как раз три измерения; т. е. элементы наших зрительных ощущений ... будут вполне определены, когда известны три из них». И если в пространстве это число равно трём, на плоскости достаточно двух координат, на линии – одной; в этом смысле пространство – трёхмерно, плоскость – двумерна, линия – одномерна.

В статье «Почему пространство имеет три измерения» [1] А. Пуанкаре определил размерность, которую можно было бы назвать антропной. Он пишет о существовании «экспериментальных фактов, которые заставляют нас приписывать пространству три измерения. Именно ввиду этих данных нам было удобнее приписать ему три измерения, а не четыре или два. Но слово «удобный», пожалуй, в данном случае недостаточно сильно: Существо, которое приписывало бы пространству два или четыре измерения, оказалось бы менее приспособленным к борьбе за существование в мире, подобном нашему». В случае двух измерений оно предполагало бы существование таких соотношений, которые мы, люди, не допускаем; а в случае четырёх – отбрасывало бы такие, которыми мы пользуемся [1].

Физическое обоснование трёхмерности пространства дано в работе П. Эренфеста [16], в которой исследуется, в частности, аналог гравитационного закона Ньютона для пространств с различным числом измерений. В этом случае зависимость гравитационных сил от расстояния определяется выражением $F = G_i M m / R^{i+1}$, где M, m, R – массы и расстояние в «классическом» понимании, i – число пространственных координат, G_i – коэффициенты, в частности, G_3 – гравитационная постоянная Ньютона. Некоторым основанием для такого предположения служат результаты анализа законов движения, полученные Эренфестом для пространств с числом измерений, отличным от трёх [16, 17].

В предложенном Ньютоном гравитационном законе сила пропорциональна R^{-2} , причём эта зависимость неоднократно проверялась экспериментально, и значение показателя степени установлено с точностью до $2 \pm 3 \cdot 10^{-11}$, следовательно, с этой же точностью размерность нашего пространства $i = 3$. Эти данные получены из прецизионных измерений орбиты Луны, движущейся вокруг Земли, и хотя средний радиус лунной орбиты равен 384 тысячам километров, модельные данные отличаются от измеренных на 4 мм [18].

4. Адекватность меры. Размерность Хаусдорфа-Безиковича

Понятие топологической размерности решает вопрос об адекватной мере для классических геометрических объектов. Простой способ измерить длину кривых, площадь поверхностей и объёмы тел состоит в разделении пространства на малые кубы или сферы с характерным линейным размером δ . Подсчитывая количество отрезков, квадратов или кубов, необходимых для покрытия рассматриваемого множества точек, можно получить меру этого множества [19].

Для обычной кривой длина L может быть определена предельным переходом

$$L = N(\delta) \delta \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} L_0 \delta^0,$$

где δ – длина прямолинейных отрезков, $N(\delta)$ – их количество. Как видно, в пределе при $\delta \rightarrow 0$ мера L становится асимптотически равной длине кривой и не зависит от δ .

Длина является адекватной мерой обычной (нефрактальной) кривой. Если поставить в соответствие линии не длину, а площадь или объём, то та же процедура покажет, что такие меры обращаются в нуль. Действительно, пусть $N(\delta)$ – количество квадратов, необходимых для покрытия кривой, δ^2 – площадь одного квадрата, тогда

$$S = N(\delta) \delta^2 \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} L_0 \delta^1 = 0;$$

аналогично,

$$V = N(\delta) \delta^3 \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} L_0 \delta^2 = 0.$$

Центральное место в определении размерности Хаусдорфа-Безиковича занимает понятие адекватности меры.

Рассмотрим множество точек, образующих поверхность в трёхмерном пространстве. Адекватная мера такого множества – площадь. Действительно,

$$S = N(\delta) \delta^2 \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} S_0 \delta^0,$$

где S_0 – площадь поверхности. Таким образом, количество квадратов, необходимых для покрытия поверхности, определяется в пределе при $\delta \rightarrow 0$ как $N(\delta) = S_0 / \delta^2$.

Если поставить в соответствие поверхности длину, то

$$L = N(\delta) \delta \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} S_0 \delta^{-1} = \infty,$$

что говорит о невозможности покрыть поверхность конечным количеством отрезков прямой. Если сделать попытку установить соответствие между поверхностью и объёмом, то он обратится в нуль

$$V = N(\delta) \delta^3 \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} S_0 \delta^1 = 0.$$

Определим меру фрактального множества, используют пробную функцию M_d , которая в зависимости от выбора её размерности d , обращалась в нуль или бесконечность при $\delta \rightarrow 0$. Введём размерность Хаусдорфа-Безиковича D_H , при которой мера M_d изменяет значение с нуля на бесконечность

$$M_d = \sum \gamma(d) \delta^d = \gamma(d) N(\delta) \delta^d \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} \begin{cases} 0, & \text{при } d > D, \\ \infty, & \text{при } d < D, \end{cases}$$

где $\gamma(d)$ – геометрический коэффициент, зависящий от формы элементов, покрывающих множество; для квадратов и кубов $\gamma(d)$ равен единице, для кругов – $\pi/4$, для сфер – $\pi/6$ [15]. Для физика такое поведение меры означает, что D представляет собой критическую размерность [20].

Существенно, что при определении размерности Хаусдорфа-Безиковича необходимо покрывать множество элементами всевозможных размеров, не превышающих некоторое малое значение, и определить $\inf$ имум выражения $\gamma(d) \sum \delta^d$. Очевидно, что процесс минимизации этой суммы по всем возможным разбиениям чрезвычайно трудоёмок, и обычно производят оценку размерности Хаусдорфа-Безиковича величиной ёмкости множества D_c . Это типичная ситуация в прикладных задачах теории размерностей: среди однотипных иногда можно найти размерности, пригодные для оценки значений других, расчёт которых трудоёмок или нереализуем.

Для определения D_c рассмотрим случай покрытия множества точек в d -мерном евклидовом пространстве минимальным количеством d -мерных кубиков (или сфер) одинакового размера. (Покрытие

сферами используется для того, чтобы не говорить об ориентации). То есть, если $N(\delta) \sim \delta^{-D_c}$, то D_c – колмогоровская ёмкость множества [6, 21]; индекс c – сокращение от англ. *saracity*.

Пусть A – величина, характеризующая покрытие, и $N(\delta) \approx A \cdot \delta^{-d}$ – минимальное количество d -мерных кубиков. Логарифмируя это выражение, получим

$$\ln N(\delta) \approx \ln A - d \ln \delta,$$

откуда, приблизительно,

$$d = -\frac{\ln N(\delta)}{\ln \delta} + \frac{\ln A}{\ln \delta}.$$

Так как $\ln \delta \rightarrow -\infty$ при $\delta \rightarrow +0$, то ёмкость множества есть предел

$$D_c = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \delta},$$

который, обычно, существует.

Поскольку при определении хаусдорфовой размерности должны использоваться всевозможные покрытия множества, а при расчёте ёмкости – элементы одного размера, то $D_H < D_c$.

Хаусдорфова размерность и ёмкость по Колмогорову могут различаться даже для очень простых множеств [6]. Например, для множества точек прямой с координатами $x_n = 1/n$ первая равна 0, вторая – 1/2. Ёмкости, в отличие от размерностей, в частности, хаусдорфовой, не остаются инвариантными при кусочно-гладком, возможно, имеющем особенности, преобразовании координат, а для величины, определяемой как размерность, такая инвариантность необходима.

Как отмечалось, во всех физических приложениях размерность определяется как показатель $M \sim l^D$, где M – некое свойство, l – характерный размер, а определить является ли она хаусдорфовой размерностью или ёмкостью не представляется возможным. Это связано с тем, что размерность описывает свойства промежуточной асимптотики, и переход к пределу, требуемый формальными определениями, невозможен. Кроме того, на малых масштабах система не является фрактальной, и её поведение описывается некоторым минимальным масштабом.

Так определённые размерность Хаусдорфа-Безиковича и ёмкость есть локальные свойства в том смысле, что характеризуют множество точек при исчезающе малом характерном размере пробной функции ($\delta \rightarrow 0$), используемой для его покрытия.

Важно, что для простых геометрических объектов хаусдорфова размерность совпадает с топологической. Действительно, пусть есть квадрат со стороной a ; покроем его малыми квадратами площадью δ^2 . Тогда для меры $A_d(\delta)$ получим

$$A_d(\delta) = \sum \delta_i^d = N(\delta) \cdot \delta^d \approx a^2 \delta^{d-2}.$$

При $d < 2$ мера $A_d(\delta)$ неограниченно возрастает при уменьшении δ , в случае $d > 2$ – стремится к нулю. Следовательно, по определению размерности Хаусдорфа-Безиковича $D_H = 2$.

5. Размерность Хаусдорфа-Безиковича как фрактальная размерность

В евклидовом пространстве R^E величина топологической размерности D_T и размерности Хаусдорфа-Безиковича D_H заключены в промежутке между нулем и E . При этом топологическая всегда является целым числом, а для размерности Хаусдорфа-Безиковича это не обязательно. Для евклидовых множеств $D_H = D_T$, в общем же случае эти две размерности должны удовлетворять неравенству Шпилрайна (Edward Szpilrajn) $D_H \leq D_T$ [5, 20].

Однако существуют множества, для которых $D_H > D_T$. В [20] Б. Мандельброт пишет: «Такие множества необходимо было как-то называть, поэтому я придумал термин «фрактал», определив его следующим образом: фракталом называется множество, размерность Хаусдорфа-Безиковича для которого строго больше его топологической размерности».

Любое множество с нецелым значением D_H является фракталом; фрактал может иметь и целочисленную размерность. Если понимать термин «дробь» как синоним выражения «нецелое вещественное число», то часто значения размерности D_H являются дробными. Учитывая, что D_H может принимать и целочисленные значения $D_T < D_H \leq E$, Бенуа Мандельброт предпочёл назвать её фрактальной размерностью [20], и обозначить через D .

6. Многообразие покрытий. Размерности Минковского-Булигана и Понтрягина-Шнирельмана

По Мандельброту фрактальная размерность и все её возможные варианты – не топологические, но метрические понятия: каждая включает в себя метрическое пространство, в котором определены расстояния между любыми двумя точками [20]. При этом сами размерности определяются алгоритмами покрытия множества d -мерными шарами и, в сущности, есть функции способа покрытия.

В способе покрытия ограниченного множества, предложенным Г. Кантором, каждая его точка рассматривается как центр шара [20]. Такой подход связан с очевидными неудобствами. Во-первых, для множеств, содержащих бесконечное количество точек, такой алгоритм неоперабелен. Ситуация, однако, разрешается тем, что, оказывается, достаточно построить конечное число шаров $N(\rho) \sim 1/\rho$.

Во-вторых, сумма перекрывающихся объёмов шаров при $\rho \rightarrow 0$ не должна непременно сходиться к протяжённости (в смысле Минковского) множества, т.е. d -мерному объёму: длине, площади, объёму и т. д. В примере Х. А. Шварца [22] показано, что по мере увеличения точности триангуляции боковой поверхности прямого кругового цилиндра, сумма площадей треугольников не обязательно сходится к её площади, а может быть равной сколь угодно большой конечной или бесконечной величине.

При рассмотрении этого парадокса Г. Минковский показал, что если определить протяжённость как

$$V\{d\text{-мерный шар радиуса } \rho\} = \gamma(d) \rho^D,$$

где d – стандартная топологическая размерность рассматриваемого множества, множитель $\gamma(d) = [\Gamma(1/2)]^d / \Gamma(1+d/2)$, ρ – радиус покрывающих шаров, D – размерность фрактального множества (если множество нефрактально, $D = d$), то при $\rho \rightarrow 0$ она может не иметь предела [20]. В этом случае выражение

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} V$$

заменяется на

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \sup V \text{ и } \lim_{\rho \rightarrow 0} \inf V -$$

верхнюю и нижнюю протяжённость множества. При этом любому вещественному числу из интервала $[\liminf, \limsup]$ соответствует, по меньшей мере, одна последовательность значений $\rho_m \rightarrow 0$, таких, что при $m \rightarrow \infty$ сумма площадей треугольников в примере Х. А. Шварца сходится к площади поверхности [20]. Г. Минковский показал также, что в случае стандартных евклидовых структур существует величина D_M – размерность Минковского – такая, что при $d > D_M$ верхняя протяжённость множества обращается в нуль, а при $d < D_M$ нижняя – бесконечна [20].

В 1928 году Ж. Булиган обобщил размерность Минковского на случай дробных d , и показал, что она определяется выражением $\lim_{\rho \rightarrow 0} \inf V$. В некоторых случаях величины размерностей Минковского-

Булигана D_{MB} и Хаусдорфа-Безиковича D_H совпадают, например, для гладких кривых и поверхностей, и с учётом того, что D_{MB} легче поддаётся оценке, и по аналогии с ситуацией с размерностью Хаусдорфа-Безиковича и ёмкостью, она может использоваться для определения величины D_H [20].

Несложно привести и обратный пример, когда такая оценка невозможна: для компактного множества $\{0, 1, 1/2, 1/3, 1/4, \dots\}$ как для всякого счётного $D_H = 0$, а $D_{MB} = 1/2$. В общем случае, как показано в [23], $D_{MB} \geq D_H$.

Среди всевозможных наборов покрывающих шаров наиболее экономичным является комплект, содержащий минимум шаров $N(\rho)$, который используют для определения размерности Понтрягина-Шнирельмана [20, 24]

$$D_{PSch} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \inf \ln N(\rho) / \ln(1/\rho).$$

7. Размерность самоподобия и клеточная размерность

Как известно, объекты инвариантны относительно изменения масштаба и параллельного переноса называются самоподобными. Если при соответствующем изменении масштаба в n раз ($n < 1$) можно однократно покрыть исходный объект уменьшенными копиями, то он самоподобен с коэффициентом подобия $n(N) = 1/N^{1/d}$, где N – количество одинаковых частей, имеющих в n раз меньший линейный размер, d – размерность подобия (самоподобия), равная топологической размерностью объекта. В случае геометрически самоподобных (регулярных) фракталов

$$n(N) = 1/N^{1/D_S},$$

где D_S совпадает с размерностью Хаусдорфа-Безиковича [19] и определяется формулой

$$D_S = \ln N / \ln n.$$

В качестве иллюстрации рассмотрим квадрат, разделённый на $N = 4$ равных квадрата со сторонами в $n = 2$ раза меньшими, чем у исходного. Тогда размерность самоподобия, равная топологической, для квадрата имеет значение 2; для куба, разделённого на $N = 8$ равных частей, $D_S = \ln 8 / \ln 2 = 3$. Для кривой Коха [19] – регулярного фрактала, при построении которого на каждой итерации масштаб покрывающих отрезков уменьшается в $n = 3$ раза, а их количество становится равным $N = 4$ размерность $D_S = \ln 4 / \ln 3 = 1,2618... = D_H$.

Для определения размерности нерегулярных объектов фрактального типа, например, изображений государственной границы или береговой линии, описанный алгоритм, естественно, не подходит, и применяют другое определение размерности, связанное с иным алгоритмом.

Пространство, в котором расположен интересующий нас объект, разбивают на клетки размером δ , например, наносят с помощью палетки на изображение объекта квадратную сетку со стороной δ , и подсчитывают число клеток, содержащих точки объекта. Разбиение многократно повторяют, используя всё меньший масштаб. Зависимость количества клеток, в которые попали точки объекта, от δ описывается выражением $N(\delta) = A\delta^{-D_S}$, где D_S – искомая фрактальная размерность самоподобия. Для расчёта её значения строят график зависимости $N(\delta)$ в двойном логарифмическом масштабе, при этом угловой коэффициент графика определяет значение D_S .

За размерностью, определённой по такому алгоритму, можно сохранить название размерности самоподобия: действительно, если применить описанный алгоритм к регулярным объектам, то значения размерностей совпадают с вычисленными по формуле для D_S . Однако как размерность, определяемую посредством подсчёта количества клеток, её называют клеточной [6, 19].

8. Размерность энтропии меры

Описанный алгоритм расчёта размерности нерегулярного фрактального множества имеет естественное ограничение: если, например, береговая линия сильно изрезана и неоднократно пересекает некую клетку, то в количество клеток, покрывающих множество точек, она всё равно даёт единичный вклад, что «не вполне честно» [19].

Рассмотрим распределение точек множества по клеткам, отражающее распределение меры. Пусть множество, состоящее из N точек, имеет в i -й клетке N_i точек. И пусть $\mu = N_i / N$ – вероятность заполнения клетки. Можно построить меру

$$M_d(q, \delta) = \sum_{i=1}^N \mu_i^q \delta^d = N(q, \delta) \delta^d \rightarrow \begin{cases} 0, & \text{при } d > \tau(q), \\ \infty, & \text{при } d < \tau(q), \end{cases} \quad \delta \rightarrow 0$$

обладающую показателем $d = \tau(q)$, при котором она не обращается в нуль или бесконечность при $\delta \rightarrow 0$ [19]. Мера характеризуется всей последовательностью показателей $\tau(q)$, определяющих степенной закон, по которому изменяются вероятности $\{\mu\}$ в зависимости от δ . При этом взвешенное число клеток равно

$$N(q, \delta) = \sum_i \mu_i^q \sim \delta^{-\tau(q)},$$

где

$$\tau(q) = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(q, \delta)}{\ln \delta}.$$

Из этих соотношений видно, что при $q = 0$ получаем $\mu_i^{q=0} = 1$. Тогда $N(q = 0, \delta)$ – количество точек, покрывающих множество, и $\tau(0) = D$ – фрактальная размерность множества. Кроме того, с учётом

$$\sum_i \mu_i = 1 \text{ получаем } \tau(1) = 0.$$

Введём производную

$$\frac{d\tau(q)}{dq} = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i^q \ln \mu_i}{(\sum_i \mu_i^q) \ln \delta},$$

и рассмотрим

$$\left. \frac{d\tau(q)}{dq} \right|_{q=1} = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i \ln \mu_i}{\ln \delta} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{S(\delta)}{\ln \delta},$$

где $S(\delta)$ – информационная энтропия разбиения меры M по ячейкам размера δ , которую можно записать в виде

$$S(\delta) = -\sum_i \mu_i \ln \mu_i \sim -\alpha_1 \ln \delta.$$

Показатель $\alpha_1 = -\left. \frac{d\tau(q)}{dq} \right|_{q=1}$ есть фрактальная размерность множества, на котором сосредоточена мера; он описывает скейлинговое поведение энтропии разбиения меры при изменении размера ячейки δ

[19]; с точностью до множителя она равна информационной размерности – второй из спектра обобщённых размерностей Реньи.

9. Обобщённые размерности Реньи

Для адекватного описания неоднородных фрактальных объектов (мультифракталов) можно использовать спектр обобщённых фрактальных размерностей А. Реньи [14, 25, 26].

Пусть есть фрактальный объект, ограниченный произвольной областью размера L в евклидовом пространстве размерности d . И пусть он представляет собой множество $N \rightarrow \infty$ точек, произвольно распределённых в этой области. Разобьём всю область на прямоугольные ячейки со стороной $\delta \ll L$ и объёмом δ^d . Ячейки, в которых содержится хотя бы одна точка, определим как занятые. Пусть $N(\delta)$ – суммарное количество занятых ячеек, $n_i(\delta)$ – количество точек в i -й ячейке; определим вероятность того, что произвольная точка множества находится в ячейке i как $p_i(\delta) = \lim_{N \rightarrow \infty} (n_i(\delta)/N)$, и введём обобщённую статистическую сумму

$$Z(q, \delta) = \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i^q(\delta).$$

Тогда по А. Реньи [25, 26] можно ввести спектр обобщённых размерностей, характеризующих распределение точек в произвольной области, и показывающих насколько оно неоднородно. Существенно, что эти размерности связаны с показателями $\tau(q)$, описанными в предыдущем разделе, как

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1},$$

где $\tau(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} (\ln Z(q, \delta) / \ln \delta)$, множитель $1/(q-1)$ выбран, чтобы для множеств постоянной плотности в E -мерном пространстве выполнялось равенство $D_q = E$ [19].

Действительно, если для равномерно распределённой меры в E -мерном пространстве с постоянной плотностью точек разделим пространство на $N = \delta^{-E}$ ячеек объёмом δ^E , тогда $\mu_i = \delta^E$ и

$$\sum_{i=1}^N \mu_i^q = \sum_{i=1}^N \delta^{qE} = \delta^{(q-1)E},$$

и, следовательно,

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln \delta^{(q-1)E}}{\ln \delta} = E.$$

Таким образом, спектр фрактальных размерностей для равномерно распределённой меры сводится к размерности пространства и не зависит от порядка момента q [19].

10. Информационная и корреляционная размерности. Свойства функции D_q

Определим смысл обобщённых размерностей Реньи D_q для $q = 1$ и $q = 2$ [14, 25, 26].

Обобщённая статистическая сумма в силу условия нормировки вероятности при $q = 1$ равна единице, что, очевидно, приводит к неопределённости $0/0$ в выражении для D_1 . Раскроем неопределённость с помощью выражения

$$Z(q, \delta) = \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i^q = \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i \exp[(q-1) \ln p_i].$$

Устремляя $q \rightarrow \infty$ и раскладывая в ряд экспоненту, с учётом условия нормировки, получим

$$Z(q \rightarrow 1, \delta) \approx \sum_{i=1}^{N(\delta)} [p_i + (q-1) p_i \ln p_i] = 1 + (q-1) \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i \ln p_i.$$

Тогда

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i \ln p_i / \ln \delta.$$

С точностью до знака числитель в этой формуле представляет собой энтропию $S(\delta)$ фрактального множества

$$S(\delta) = - \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i \ln p_i,$$

и

$$D_1 = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{S(\delta)}{\ln(\delta)}.$$

Таким образом, величина D_1 характеризует информацию, необходимую для определения положения точки в некоторой ячейке, и показывает, как возрастает количество информации при стремлении размера ячейки к нулю $S(\delta) \approx \delta^{-D_1}$, и называют информационной размерностью [14, 25].

Определение D_1 через энтропию даёт возможность сравнить величины фрактальной и информационной размерностей: расчёт D_1 имеет смысл лишь в случае неоднородности фрактального множества точек, для которого энтропия меньше, чем для однородного, и, следовательно, всегда $D_1 < D_0$ (равенство, очевидно, возможно лишь для однородного случая). В теории размерности этот результат обобщён для произвольного q , и показано, что имеет место неравенство

$$D_0 \geq D_1 \geq D_2 \geq D_3 \dots$$

Для определения физического смысла обобщённой размерности D_2 , равной

$$D_2 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left(\ln \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i^2 / \ln(\delta) \right),$$

введём парный корреляционный интеграл

$$I(\delta) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{n,m} \theta(\delta - |r_n - r_m|).$$

Здесь суммирование проводится по всем парам точек фрактального множества с радиус-векторами r_n и r_m , а $\theta(x)$ – ступенчатая функция Хэвисайда. Эта сумма определяет число пар точек (n, m) , расположенных на расстоянии меньше, чем δ , и, следовательно, будучи разделённой на N^2 , равна вероятности того, что две произвольные точки обладают этим свойством.

Эту же вероятность можно найти иначе [14, 25, 26]. По определению величина p_i^2 – вероятность попадания двух точек в i -ю ячейку с размером δ . Суммируя p_i^2 по всем занятым ячейкам, получим вероятность того, что две произвольно выбранные точки из множества лежат внутри одной ячейки с размером δ . Следовательно, расстояние между ними будет порядка δ или меньше. Тогда, с точностью до численных коэффициентов

$$I(\delta) \approx \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i^2 \approx \delta^{D_2}.$$

Таким образом, обобщённая размерность D_2 определяет зависимость корреляционного интеграла $I(\delta)$ в пределе $\delta \rightarrow 0$, и называется корреляционной [25].

С помощью вероятностной интерпретации удобно выяснить смысл граничных размерностей спектра Реньи: минимальной $D_\infty = \lim_{q \rightarrow \infty} D_q$ и максимальной $D_{-\infty} = \lim_{q \rightarrow -\infty} D_q$.

Величина $D_{-\infty}$ – определяет формальную верхнюю границу интервала изменений D_q (максимальное значение имеет размерность D_0 , т. к. размерности в спектре определены для неотрицательных q), размерность D_∞ – минимальная из размерностей.

При $q \rightarrow \infty$ основной вклад в обобщённую статистическую сумму, очевидно, вносят ячейки с наибольшей вероятностью заполнения, т.е. содержащие максимальное число частиц; при $q \rightarrow -\infty$, соответственно, – самые разреженные. Тогда, с учётом описанного выше,

$$D_{-\infty} \geq D_0 \geq D_1 \geq D_2 \geq D_3 \geq \dots \geq D_\infty.$$

В качестве иллюстрации рассмотрим расчёт спектра размерностей Реньи для неоднородного канторова множества [27].

Пусть два интервала, остающиеся от отрезка, образованного на предыдущем шаге итерационной процедуры построения множества, имеют длины, относящиеся как a/b , причём $a+b=1$. Тогда, фигурирующая в выражении для статистической суммы вероятность p_i^q распадается на два слагаемых,

$$(ap_i)^q + (bp_i)^q,$$

так что

$$Z_{k-1} = (a^q + b^q) Z_k.$$

С учётом, что $\delta(k) = 3^{-k}$, имеем

$$D_q = \frac{1}{1-q} \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k \log(a^q + b^q)}{-k \log 3} = \frac{\log_3(a^q + b^q)}{1-q}.$$

В частном случае $a = b = 1/2$ все D_q одинаковы и равны хаусдорфовой размерности множества

$$D_q = \frac{\log_3(2^{-q} + 2^{-q})}{1 - q} = \log_3 2.$$

Для другого частного случая, когда $a = 3/4$, $b = 1/4$, канторово множество неоднородно и образует мультифрактал с $D_0 = \log_3 2 \approx 0,631$, $D_1 \approx 0,512$, $D_2 \approx 0,428$, $D_\infty \approx 0,262$, $D_{-\infty} \approx 1,262$ [27].

11. Внешняя и внутренняя размерности кривой

Если применить идеи Хаусдорфа для определения размерности фрактальной кривой, и для этого строить вокруг её точек γ кружки радиуса $\delta \rightarrow 0$ и вычислять площадь их объединения $S(\delta)$ (учитывая площадь перекрытия нескольких кружков только один раз), то скорость убывания площади с уменьшением δ определит размерность кривой [28].

Действительно, для гладкой кривой $S(\delta) \sim \delta \cdot L$, где L – её длина, для плоской области $S(\delta) \sim \delta^0$, а для фрактала оценка площади, которая определяется шириной окрестности кривой, зависит в этом случае не от радиуса кружка, а от размера изгибов кривой. Определим длину «волнового вектора» $k = 1/\delta$, тогда отдельные «периоды» изгибов кривой укладываются в кружке размера δ , и если $\alpha(k)$ при $\delta \rightarrow 0$ убывает медленнее, чем δ , то ширина полосы кружков не порядка δ , а порядка $\alpha(1/\delta)$; при $\alpha(1/\delta) < \delta$ полоса кружков успевает отслеживать все изгибы кривой, и является не фрактальной, а гладкой [28].

Пусть кривая γ – фрактальна. Тогда суммарная площадь объединений всех кружков $S(\delta) \sim \alpha(1/\delta) \sim \delta^\alpha$, и если $0 < \alpha < 1$, то $S(\delta)$ убывает медленнее, чем для гладкой кривой, следовательно, кривая γ занимает промежуточное положение между линией и площадью. Хаусдорф предложил определение, согласно которому размерность такого образования равна

$$\dim_{\text{ext}} \gamma = 2 - \alpha.$$

Индекс ext (сокращение от external – англ. «внешний; наружный») указывает, что при построении этой величины нам пришлось выйти за пределы самой кривой [28].

По аналогии с двумерным случаем внешняя размерность фрактальной кривой в пространстве равна

$$\dim_{\text{ext}} \gamma = 3 - 2\alpha,$$

в n -мерном –

$$\dim_{\text{ext}} \gamma = n - (n - 1) \alpha.$$

Определим внутреннюю размерность кривой γ . Для этого разделим её на участки длиной δ и введём параметр l . Вычислим длину кривой, учитывая лишь те её изгибы, на которых l изменяется не менее чем на δ . Получим, что сумма длин этих отрезков порядка $\alpha(1/\delta)$ $(1/\delta) \sim \delta^{\alpha-1}$ и стремится к бесконечности с уменьшением δ [28].

С чем связана эта расходимость. Предположим, вслед за авторами [28], что мы ошиблись в определении размерности нашего объекта и исследуем не кривую, а пытаемся определить одним параметром плоскость. Такая параметризация, конечно, плоха – линия всё более плотно и с самопересечениями заполняет плоскость, образуя на ней подобие решётки. Расстояние между её полосами $\sim \delta$, а число квадратов $\sim 1/\delta^2$. Размеры звеньев ломаной, плотно устилающей плоскость, малы, но число их очень велико: сумма длин отрезков ломаной $\sim \delta \cdot 1/\delta^2 \rightarrow \infty$. И это естественно: так как область двумерна, нужно подсчитывать не её длину, а площадь, т.е. суммировать не длины сторон, а квадраты длин, сумма которых конечна [28].

В случае дробной размерности нужно суммировать некоторые μ -е степени длин. Для конечности получающихся сумм нужно положить $\mu = 1/\alpha$. Размерность этой суммы равна $\text{cm}^{1/\alpha}$, а само число $1/\alpha$ является размерностью. Тогда в качестве внутренней размерности фрактала естественно принять число

$$\dim_{\text{int}} \gamma = 1/\alpha.$$

Эта формула сохраняется и для кривых в пространстве любого числа измерений.

Внешняя размерность кривой фрактального типа на плоскости изменяется от 1 до 2 (размерность пространства), а внутренняя – от 1 до бесконечности, и совпадают они только для тривиального случая гладкой кривой. В общем случае внешняя размерность фрактальной кривой изменяется от размерности гладкого объекта до размерности пространства, а внутренняя – от размерности гладкого объекта до бесконечности [28].

«Очевидно, что в разных физических задачах нужно пользоваться разными определениями фрактальной размерности. Например, если мы интересуемся задачей адсорбции на тонкую нитку, то для нас важно знать, сколько атомов сможет поместиться вблизи нитки, т.е. внешнюю размерность. Если же мы хотим оценить вес нитки, то важна размерность внутренняя» [28].

11. Массовые размерности

В структуре вещества всегда можно выделить масштаб, равный корреляционной длине ξ , т.е. расстоянию, вне которого частицы вещества ведут себя статистически независимо, и которое определяет верхнюю границу промежуточной асимптотики, а значит, и границу между интенсивным и экстенсив-

ным поведением плотности вещества тела. Действительно, при $l < \xi$ масса тела определяется соотношением $M \sim l^D$, где D – фрактальная размерность, и выражением $M \sim l^d$ при $l > \xi$ (здесь d – размерность пространства). Тогда плотность можно определить как

$$\rho = \begin{cases} M / l^d \sim l^{D-d}, & \text{при } l \leq \xi \\ \text{const}, & \text{при } l > \xi. \end{cases}$$

Воспользуемся этим соотношением, и рассчитаем, для примера, массу кубика сахара рафинада с ребром L . Существует альтернатива: определить массу через среднюю плотность ρ как

$$m = \rho L^3,$$

или учесть, что песчинки сахара образуют статистически самоподобную структуру, и тогда масса равна

$$m = \rho_c L^{D_m},$$

где ρ_c – плотность сахара, D_m – массовая размерность.

В отличие от «сплошного» тела во фрактальном объекте средняя плотность зависит от объёма, т.е. является экстенсивной физической величиной, убывающей при его возрастании. Последнее обстоятельство легко объясняется редко используемым, «ненаучным» определением фрактала, предложенным Б. Мандельбротом в частной беседе: фрактал как физическое тело – объект, в котором присутствуют дыры всех размеров. Действительно, средняя плотность головки швейцарского сыра меньше средней плотности отрезанного от неё кусочка: в нём и дыр меньше, и размеры их меньше.

Из равенства

$$\rho L^3 = \rho_c L^{D_m}$$

следует, что показатель D_m , равный

$$D_m = 3 - \ln(\rho_c/\rho)/\ln L,$$

определяет массовую фрактальную размерность через истинную и среднюю плотности сахара (что особенно удобно в экспериментальных исследованиях), и характерные размеры тела.

Массовую размерность D_M можно определить и по-другому. Пусть нужно рассчитать массу фрактального шара. В этом случае зависимость массы от радиуса ведёт себя как

$$M(R) \sim R^{D_M},$$

где D_M – массовая фрактальная размерность. Очевидно, что в пределе

$$D_M = \lim_{R \rightarrow \infty} (\ln M(R)/\ln R).$$

Так определённые массовые размерности, очевидно, являются глобальными характеристиками.

Для строго самоподобных математических фракталов, например, ковры Серпинского или канторовой пыли, массовая размерность D_M совпадает с размерностью Хаусдорфа-Безиковича, потому что определяется размерностью подобия скейлингового закона, которая задаётся алгоритмом, порождающим фрактал [29].

12. Химическая размерность

Если рассматривать перколяционный кластер как решёточную модель ветвящейся полимерной молекулы, то узлы решётки при этом соответствуют мономерам, расстояния между узлами – химическим связям, а число шагов по кластеру – количество химических связей вдоль пути по молекуле от i -го мономера к j -му – можно определить как химическое расстояние. Размерность, связанная с этим расстоянием, называется химической, или размерностью связности D_{ch} [6].

Для определения D_{ch} рассмотрим шар B_{ch} как множество узлов, для которых $R_{ch} \leq n$, и определим химическую размерность как показатель такой, что количество узлов N , принадлежащих B_{ch} , растёт как $N \sim n^{D_{ch}}$.

Величина D_{ch} есть отношение двух размерностей – фрактальной размерности кластера D и размерности D_R кривой, длина которой определяет химическое расстояние. Для двумерного случая численно определённое значение D_{ch} равно 1.72, следовательно, размерность «геодезической» равна $D_R = D / D_{ch} \approx 1.10$; видно, что это «не слишком изломанная линия» [6].

13. Эффективная размерность

Эффективная размерность – понятие, которое выражает соответствие между математическими множествами и модельными объектами, и которому, по мнению Б. Мандельброта, не следует давать точного определения [20].

Как составляющая модельного описания, эффективная размерность обладает «особым взглядом». Известно, что макроскопические объекты, даже такие «тщедушные» как крылышки пчелы, семена клубники, шёлковая нить и паутина являются трёхмерными телами. Но в математических моделях можно

полагать, что крылышки имеют размерность два, что размерность семян – нуль, нити – один, а паутины – между 1 и 2.

Субъективная составляющая эффективной размерности хорошо видна в примере Б. Мандельброта [20]. «Пусть есть шар диаметром 10 см, скрученный из толстой нити диаметром 1 мм. Удалённому наблюдателю клубок покажется фигурой с нулевой размерностью, т.е. точкой. С расстояния в 10 см шар из нитей выглядит как трёхмерное тело, а с расстояния в 10 мм – как беспорядочное переплетение одномерных нитей. На расстоянии в 0,1 мм каждая нить превратится в толстый канат, а вся структура целиком опять станет трёхмерным телом. На расстоянии 0,01 мм «канаты» превратятся в переплетение волокон, и шар снова станет одномерным, и так далее. Наконец, когда клубок превратится в скопление, состоящее из какого-то конечного числа точек, имеющих размеры, сравнимые с атомными, его размерность снова станет равной нулю» [20].

14. Вместо заключения

Физическим объектам и процессам всегда может быть сопоставлен набор размерностей, характеризующих их свойства; выбор размерностей, естественно, определяется целью исследования и существом решаемой задачи.

Понятие размерности стимулировало исследования и прояснило существенные черты ряда физических систем, позволило сформулировать новые модели и понятия, достичь более полного понимания многих давно изучаемых явлений [6, 7, 20, 28].

Литература

1. Poincaré H. Pourquoi l'espace à trois dimensions. // *Revue de métaphysique et de morale*. – 1912. – V. 20. – P. 483-504; перевод: Пуанкаре А. Почему пространство имеет три измерения. / В кн. А. Пуанкаре О науке. – М.: Наука, 1990. – С. 555-579.
2. Lebesgue H. Sur la non applibilité de deux domaines appartenant à des espaces à n et $n + p$ dimensions (extrait d'une lettre à M.O. Blumenthal). // *Math. Ann.* – 1911. – V. 70. – P. 166-168.
3. Brouwer L.E.J. Über den natürlichen Dimensionsbegriff. // *Journal Für Die Reine Und Angewandte Mathematik*. – 1913. – V. 142. – P. 146-152.
4. Математический энциклопедический словарь. – М.: СЭ, 1988. – 848 с.
5. Гуревич В., Волман Г. Теория размерности. – М.: ГИИЛ, 1948. – 232 с.
6. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. – М.: Мир, 1982. – 176 с.
7. Соколов И.М. Размерности и другие критические показатели в теории протекания. // *УФН*. – 1986. – Т. 150, вып. 2. – С. 221-255.
8. Меньшиков М.В., Молчанов С.А., Сидоренко А.Ф. Теория перколяции и некоторые приложения. / *Итоги науки и техники. – Серия Теория вероятностей. Математическая статистика*. – Т. 24. – М.: ВИНТИ, 1986. – С. 53-110.
9. Козлов С.М. Геометрические аспекты усреднения. // *УМН*. – 1989. – Т. 44, вып. 2. – С. 79-120.
10. Меньшиков М.В. Оценки перколяционных порогов для решеток в R^n . // *Доклады АН СССР*. – 1985. – Т. 284, № 1. – С. 36-39.
11. Жиков В.В. Асимптотические задачи, связанные с уравнением теплопроводности в перфорированных областях. // *Математический сборник*. – 1990. – Т. 181, вып. 10. – С. 1283-1305.
12. Физический энциклопедический словарь. – М.: СЭ, 1984. – 944 с.
13. Схоутен Я.А. Тензорный анализ для физиков. – М.: Наука, 1965. – 456 с.
14. Гринченко В.Т., Мацьпура В.Т., Снарский А.А. Введение в нелинейную динамику. Хаос и фракталы. – М.: ЛКИ, 2010. – 280 с.
15. Пуанкаре А. Наука и гипотеза. / В кн. А. Пуанкаре О науке. – М.: Наука, 1990. – С. 38-78 с.
16. Ehrenfest P. In that way does it becomes manifest in the fundamental laws of physics that space has three dimensions? // *Proceedings of Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*. – 1918. – V. 20, iss. 1. – P. 200-209; reprinted in *Paul Ehrenfest Collected Scientific Papers*. / Ed. by M.J. Klein. – Amsterdam: North Holland Publ. Co., 1959. – P. 400-409.
17. Пуга В.А. Мультиразмерное гравитационное взаимодействие. Кривые вращения галактик. // *ЖЭТФ*. – 2014. – Т. 146, вып. 3 (9). – С. 500-512.
18. Турышев С.Г. Экспериментальные проверки общей теории относительности: недавние успехи и будущие направления исследований. // *УФН*. – 2009. – Т. 179, вып. 1. – С. 3-34.
19. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
20. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: ИКИ, 2002. – 656 с.
21. Колмогоров А.Н., Тихомиров В.М. Е-энтропия и ϵ -ёмкость множеств в функциональных пространствах. // *УМН*. – 1959. – Т. 14, вып. 2 (86). – С. 3-86.
22. Гелбаум Б., Олмстед Дж. Контрпримеры в анализе. – М.: Мир, 1967. – 251 с.

23. Kahane J.P., Salem R. Ensembles parfaits et series trigonometriques. – Paris: Hermann, 1963. – 192 p.
24. Pontrjagin L., Schnirelman L. Sur une propriété métrique de la dimension. // Ann. Math. – 1932. – V. 33. – P. 156-162; перевод Понтрягин Л., Шнирельман Л. Об одном метрическом свойстве размерности. / В кн. [5], с. 210-218.
25. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ РХД, 2001. – 128 с.
26. Rényi A. Probability theory. – Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1970. – 666 p.
27. Кузнецов С.П. Динамический хаос. – М.: Физматлит, 2006. – 356 с.
28. Зельдович Я.Б., Соколов Д.Д. Фракталы, подобие, промежуточная асимптотика. // УФН. – 1985. – Т. 146, вып. 3. – С. 493-506.
29. Шрёдер М. Фракталы, хаос, степенные законы. – Ижевск: НИЦ РХД, 2001. – 528 с.

УДК 66.021.001.57:56/59.004.18

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ БЛОКА ЛЬДА

Бурдо О.Г., Тришин Ф.А., Гергега А.Н.

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

На основе анализа экспериментальных данных показано, что поверхность блока льда имеет фрактальные свойства. Предложена теплофизическая модель массопереноса с учетом фрактальных особенностей поверхности блока. Анализируется специфичный двухфазный подслей, состоящий из раствора и разномасштабных элементов льда, рассмотрены конкурирующие процессы, формирующие механизмы кристаллизации в условиях специфичной структуры поверхности.

By analyzing experimental data, authors showed that surface of the ice block have fractal properties. Thermo-physical model of mass transfer on fractal surface of ice block was proposed. Two-phase sublayer consisting of a solution and multiscale ice elements are analyzed. The competing processes which forming mechanisms crystallization in the specific conditions was considered.

Ключевые слова: кристаллизация, моделирование, блочное вымораживание, фрактальная поверхность.

Вступление. Процессы низкотемпературного разделения пищевых растворов становятся все более привлекательными для современных технологий. Особый интерес представляют аппараты блочного вымораживания [1-3], которые реализуют принцип адресной доставки энергии, направленной кристаллизации. Они просты в изготовлении, отличаются высокой энергетической эффективностью и сохранением функциональных свойств сырья. Анализ принципов математического моделирования, представленный в [4], показал, что многочисленные предложения не учитывают влияние современных методов интенсификации массопереноса при кристаллизации, не приемлемы при протекании комбинированных процессов. Нет корректных представлений и в простых эмпирических моделях по кинетике кристаллизации воды на поверхности ледяной фазы.

Одним из основных параметров, которые определяют поток энергии или массы в задачах переноса, является площадь поверхности контакта фаз, участвующих в процессе. Однако, как правило, этот параметр принимается в кинетических уравнениях постоянным, его структура и изменения во времени не учитываются. В работе поставлена задача учесть фактор поверхности в задачах массопереноса. Рассматривается процесс формирования блока льда из раствора. Такая проблема важна при моделировании аппаратов блочного вымораживания [2].

Физическая модель процесса блочного вымораживания. Рассмотрим процесс формирования блока льда на горизонтальной плоской поверхности (рис.1).

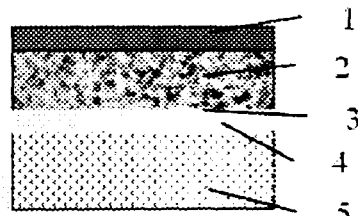


Рис. 1 – Физическая модель процесса вымораживания.

На поверхности 1, температура которой ниже криоскопической температуры раствора 5, формируется твердая фаза (лед) 2. Поверхность контакта фаз 3 и раствор разделяет диффузионный пограничный слой 4. Именно этот слой определяет интенсивность массообменных процессов, кинетику роста блока льда. Условия естественной конвекции, характерные для рассматриваемого процесса, не имеют факторов эффективного влияния на интенсификацию процесса льдообразования.

Кинетика формирования блока льда определяется уравнением массоотдачи

$$M = \beta F \Delta C \quad (1)$$

Поток массы (M) пропорционален коэффициенту массоотдачи (β), движущей силе процесса кристаллизации (ΔC) и площади поверхности фазового контакта (F). Предметом дальнейшего анализа является площадь поверхности контакта фаз.

Традиционно эта поверхность для схемы (рис.1) определяется произведением ширины блока льда на его длину. Однако известно, что блок льда имеет пористую структуру [2]. В соотношении (1) этот фактор не участвует. Рассмотрим структуру блока льда с учетом его пористости. Пористость блока льда обусловлена системой капиллярных каналов. Представим эти каналы в первом приближении в виде схемы (рис.2) с правильными геометрическими формами.

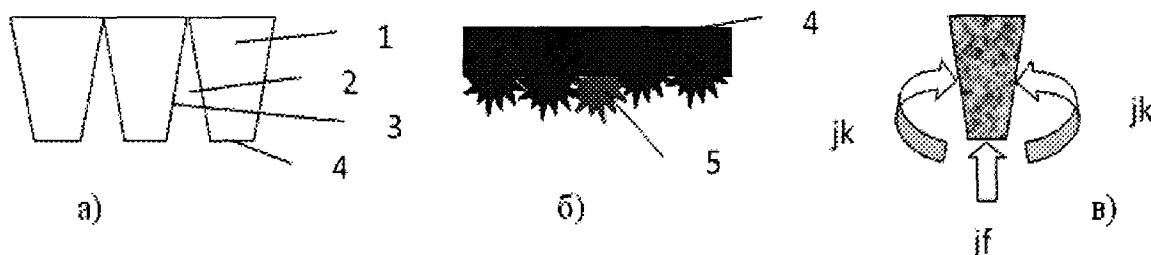


Рис. 2 – Идеализированная структура пористого блока льда (а), поверхность контакта фаз (б) и схема потоков массы в блок льда (в)

Известно, что с ростом толщины блока льда увеличивается его пористость [1–3]. Следовательно, общая поверхность фазового контакта растет. А это в соответствии с уравнением (1) позитивно влияет на рост массы льда. Т.е. скорость увеличения толщины блока и массы льда в процессе кристаллизации при неизменных значениях β и ΔC должна расти. Однако результаты экспериментального моделирования [1 – 3] свидетельствуют, что рост блока (и по размерам, и по массе) всегда во времени снижается. Значит снижается и скорость вымораживания. В какой то степени это объясняет уменьшение движущей силы процесса ΔC . Но специальный анализ [2] показывает, что в большей степени влияет интенсивность массопереноса. Коэффициент массоотдачи β в начале процесса вымораживания выше и со временем он снижается.

Установлен факт, что концентрации раствора в пограничном слое поверхности 4 и в капиллярах блока разная. Типичная качественная зависимость приведена на рис.3. Методика опытов заключалась в том, что после вымораживания блок льда выдерживался в воздушной среде при температуре 4...7 °С. Периодически стоки раствора собирались, и определялась их концентрация [2, 3].

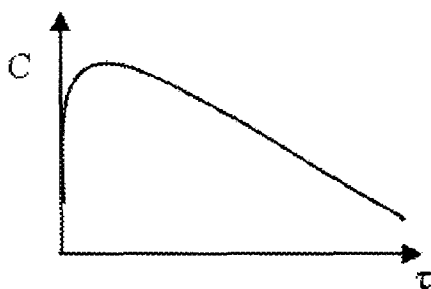


Рис. 3 – Изменение концентрации.

Установлено, что всегда первые стоки имеют концентрацию на 2...3 процента выше, чем в объеме раствора. Со временем t концентрация стоков C растет и достигает максимума. Объяснить этот факт можно тем, что постепенно начинают удаляться стоки из капиллярной структуры блока. В точке максимума превышение концентрации стоков может достигать 10 %

Из приведенных фактов можно сделать ряд выводов:

- в процессе блочного вымораживания растет пористость блока льда, что приводит к повышению общей величины поверхности контакта в системе «лед - раствор»;

- повышение поверхности контакта фаз не приводит к росту скорости формирования блока льда;

- концентрация сухих веществ в пограничном слое

выше, чем в объеме раствора;

- концентрация сухих веществ в капиллярах блока выше, чем в пограничном слое;

- диффузионное сопротивление массопереносу при блочном вымораживании со временем растет.

Таким образом, существует научное противоречие – развитие поверхности контакта фаз в процессе блочного вымораживания снижает производительность установки по производству льда. Этот парадокс требует анализа.

Общий поток массы в блок льда формируется из потоков на торцевых участках 4 и боковых стенках 3 капилляров 2 (рис.2). Удельный поток j_f представляется отношением соответствующей массы к площади поверхности 4: $j_f = M_f(R_f)$. А удельный поток массы в капиллярах 2 аналогично: $j_k = M_k(R_k)$. Тогда соотношение (1) примет вид

$$M = M_f + M_k = (R_f)^{-1} F_f \Delta C_f + (R_k)^{-1} F_k \Delta C_k \quad (2)$$

Значение F_f определяется пористостью поверхности ε и параметром a (аналогом шероховатости):

$$F_f = \varepsilon F(1+a) \quad (3)$$

а F_k – числом z и длиной капилляра (толщиной блока льда) l и эквивалентным диаметром d_e :

$$F_k = z \pi d_e l (1+a) \quad (4)$$

Механизмы сопряженных гидродинамических, тепловых и массообменных процессов. Самостоятельный анализ необходим для оценки диффузионных сопротивлений. В общем виде этот параметр определяется отношением толщины диффузионного слоя δ к соответствующему коэффициенту диффузии D . Представляется, что пограничный слой является комбинированным из 2 подслоев (рис.4).

Подслой δ_1 формируется непосредственно на торце 4 блока, и является двухфазным, состоящим из кристаллов льда 5 и концентрированного раствора. Второй подслой δ_2 – это традиционный диффузионный пограничный слой. Представляется, что $\delta_2 \gg \delta_1$. Концентрация сухих веществ подслоя 2 несколько ниже, чем в подслое 1.

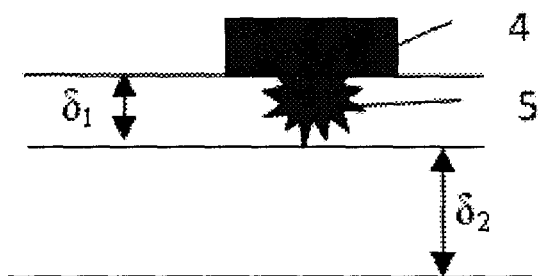


Рис. 4 – Фрагмент поверхности льда

Наличие кристаллов льда в подслое 1 определяет его специфику, которая выражается в условиях формирования гидродинамического, теплового и диффузионного слоев. Гидродинамические особенности характеризуются наличием микро- и наноразмерных каналов, в которых кроме традиционных сил начинают проявляться силы поверхностного натяжения. Структура объема 5 способна механически удерживать раствор, препятствовать его перемещению в толщине подслоя.

Тепловые режимы подслоя 1 и 2 существенно отличаются. Твердая фаза (лед 5) подобно ребрам способствует интенсификации теплопереноса. Термическое сопротивление контакта элементов 4 и 5

(рис.4) отсутствует, теплопроводность твердой фазы выше, чем раствора. Такие условия предполагают интенсификацию и массообменных процессов при кристаллизации. Таким образом, гидродинамическая ситуация в подслое 1 тормозит процессы массопереноса, а тепловая – их интенсифицирует. Результат такого противоречивого действия в объеме пограничного слоя 1 прогнозировать сложно.

Схемы формирования пограничных диффузионных слоев на торцах и в капиллярах отличаются. Подслой 1 в капиллярах тепловые режимы реализует аналогично схеме (рис.4), а гидродинамическая ситуация в этом подслое значительно сложнее. Эвакуация раствора из межкристаллической структуры льда здесь встречается с дополнительными барьерами, которые связаны с практически вертикальной ориентацией стенок капилляра.

Выполненные исследования позволяют конкретизировать некоторые выводы.

Для поверхности торцов блока льда.

Подслой 1:

- в связи с ростом пористости блока льда базовая поверхность подслоя уменьшается;
- из-за формирования кристаллических элементов поверхность подслоя растет;
- двухфазная структура подслоя приводит к снижению термического сопротивления подслоя, что является предпосылкой интенсификации процессов массопереноса;
- наличие кристаллических элементов ухудшает гидродинамическую ситуацию в подслое, что негативно влияет на процессы массообмена на поверхности льдообразования;
- наличие кристаллических элементов в объеме снижает движущую силу процесса кристаллизации.

Подслой 2:

- двухфазная структура подслоя 1 является дополнительным барьером процессу массопереноса, что оказывает влияние на диффузионное сопротивление подслоя 2.

Для поверхности стенок капилляров.

Подслой 1:

- в связи с ростом пористости блока льда поверхность подслоя в капиллярах растет. Из-за формирования кристаллических элементов поверхность подслоя также растет;
- наличие кристаллических элементов ухудшает гидродинамическую ситуацию в подслое и снижает движущую силу процесса кристаллизации, что негативно влияет на процессы массообмена на поверхности льдообразования.

Подслой 2:

- стесненность конвективных процессов в объеме капилляра усложняет гидродинамическую ситуацию, что снижает интенсивность массоотдачи и уменьшает движущую силу процесса кристаллизации.

Блок льда как фрактальный объект. Существуют две основные группы физических задач, в которых проявляются фрактальные свойства объекта исследования, и в которых размерность является реальным инструментом получения и анализа решений [5].

Первая – это задачи стохастической динамики, в частности, проблемы турбулентности. В этих задачах размерности являются доступными для измерения и структурно устойчивыми характеристиками системы, связанными, в частности, с показателями Ляпунова; позволяют провести классификацию странных аттракторов и связанного с ними хаотического поведения [6, 7].

Вторая группа – задачи перколяционной теории: раздела статистической физики, который на протяжении полувека изучает критические явления [6, 7]. Перколяционная теория адекватно описывает особенности возникновения и эволюции, а также свойства связанных областей в системах, в которых имеет место геометрический фазовый переход. Она нашла применение в широком круге научно-технических задач: исследовании белковых структур, пористых тел, создании фильтров, изучении легированных полупроводников, при борьбе с эпидемиями, в исследованиях процессов полимеризации, при создании композиционных материалов, изучении мировоззренческих вопросов и многих других. При этом для критических показателей физических величин, описывающих процессы и явления, как правило, можно указать множество, с размерностью которого этот показатель связан. В свою очередь, исследование структуры этих множеств много дает для понимания критического поведения системы и соотношений между показателями, позволяет проследить связь между поведением системы в промежуточной асимптотике и ее геометрией [6, 7].

Анализ экспериментальных данных, полученных при изучении процесса вымораживания водного раствора сахара [2] показал, что блок льда обладает, по крайней мере, двумя характеристиками, присущими фрактальному телу.

Одна из атрибутивных черт фрактального объекта – наличие среди параметров экстенсивной плотности [8, 9]. Это значит, что в отличие от «сплошных» тел, во фрактальных средняя плотность зависит от объема и убывает при его возрастании. В исследованных блоках по мере возрастания массы льда наблюдается нелинейный рост пористости, и, следовательно, уменьшение средней плотности. Во-вторых, развитая поверхностная пористость ледового блока приводит к статистическому самоподобию в распределении микролаун на его поверхности и фрактальной зависимости ее площади от величины блока $S \sim l^D$, где размерность определяется как $2 < D < 3$ [8-12].

Выводы. Пограничный слой при кристаллизации воды на поверхности блока льда специфичен. Он содержит двухфазный подслей, механизмы гидравлических, тепловых и массообменных процессов в котором отличаются от принятых в традиционных конвективных задачах. Возникают противоречия при анализе влияния фактора пористости блока льда на результат процесса – производительности установки по вымороженной фракции. Блок льда характеризуется зависимостью средней плотности от объема, что позволяет рассматривать его как объект фрактального типа. Можно предположить, что привлечение методов фрактального анализа к исследованию диффузионных, тепловых и гидродинамических сопротивлений позволит сформировать корректную модель сопряженных процессов вымораживания воды в аппаратах направленной кристаллизации.

Литература

1. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК. – Одесса: Полиграф, 2009. – 288 с.
2. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011. – 294 с.
3. Бурдо О.Г., Офатенко О.О. Анализ процессов деминерализации воды. // 36. наук. праць ОНАХТ Одеса, 2009. – Вип.35. – С. 287- 292.
4. Бурдо О.Г., Тришин Ф.А., Трач А.Р. Моделирование процесса кристаллизации воды в ультразвуковом поле. // Пищевая наука и технология.- 2015 №1 (30). – С. 75 – 80.
5. Герега А.Н. Ещё раз о геометрических методах в теоретической физике. / Тезисы докладов международной конференции «Геометрия в Одессе-2015». – Одесса: Фонд «Наука», 2015. – С. 70.

6. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. — М.: Мир, 1982. — 176 с.
7. Соколов И.М. Размерности и другие критические показатели в теории протекания. // УФН. — 1986. — Т. 150, вып. 2. — С. 221-255.
8. Федер Е. Фракталы. — М.: Мир, 1991. — 254 с.
9. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. — М.: ИКИ, 2002. — 656 с.
10. Гергеа А.Н. Моделирование кластерных структур в материале: силовые поля и дескрипторы. // Физическая мезомеханика. — 2013. — Т. 16, №5. — С. 87-93.
11. Herega A.N. Physical aspects of the processes self-organization in composites. 1. Simulation of percolation clusters phases and inner boundaries. // Journal on Composite Mechanics and Design. — 2013. — V. 19, №3. — P. 406-419.
12. Herega A.N. Physical aspects of the processes self-organization in composites. 2. Structure and interaction of inner boundaries. // Journal on Composite Mechanics and Design. — 2013. — V. 19, №4. — P. 525-534.

УДК [664.723.011:633.11]:631.365

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПШЕНИЦЫ В СУШИЛКЕ НА БАЗЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТЕРМОСИФОНА

Безбах И.В., канд. техн. наук, доц., Воскресенская Е.В., инженер каф. ПАиЭМ
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина

Исследовательский интерес статьи посвящен моделированию процесса сушки пшеницы в сушилке на основе вращающегося термосифона. Актуальность вопроса продиктована необходимостью снижения энергозатрат на процесс сушки пшеницы в аграрных масштабах. В связи с этим, разрабатываются и исследуются новые энергоэффективные конструкции сушильных аппаратов.

The research interest of current paper is devoted to the modeling of drying process of wheat in drier with rotating thermosyphon. The actuality of problem is dictated by the necessity of wheat drying power inputs decrease in agricultural scales. In view of this new energy efficient constructions of drying apparatuses are being elaborated and researched.

Ключевые слова: сушка пшеницы, вращающийся термосифон

Анализ состояния зерносушильной техники на пищевых предприятиях Украины показывает, что в 48% случаев эксплуатируются шахтные агрегаты отечественного производства, энергозатраты которых составляют 5 МДж/кг и выше. При модернизации предприятий многие аграрии собираются уделить внимание участкам сушки (до 15 %) как одним из наиболее затратных в составе зернохранилищ [1]. Недостатки шахтных конвективных зерносушилок: невысокий КПД использования объема сушильного аппарата; малый удельный съем влаги; неравномерность сушки; высокие энергозатраты.

Гораздо реже (5 %) для сушки зерновых применяют сушилки с использованием водяного пара в качестве тепло- влагоносителя [1]. Такие сушилки обеспечивают высокие коэффициенты теплопередачи 30-90 Вт/м² К. Недостатки конструкций: сложная аппаратно-техническая реализация, необходимы дополнительные устройства для подачи пара, отвода конденсата, образование водяных пробок в трубках, низкая степень перемешивания зернового потока.

В связи с этим вопрос разработки новых видов зерносушильной техники актуален. Решение проблемы – использование термосифонов (ТС), вращающихся термосифонов (ВТС), тепловых труб в технологиях сушки, утилизации теплоты уходящих газов зерносушильных установок. Использование схем на базе ВТС даст возможность экономии до 30 % энергии.

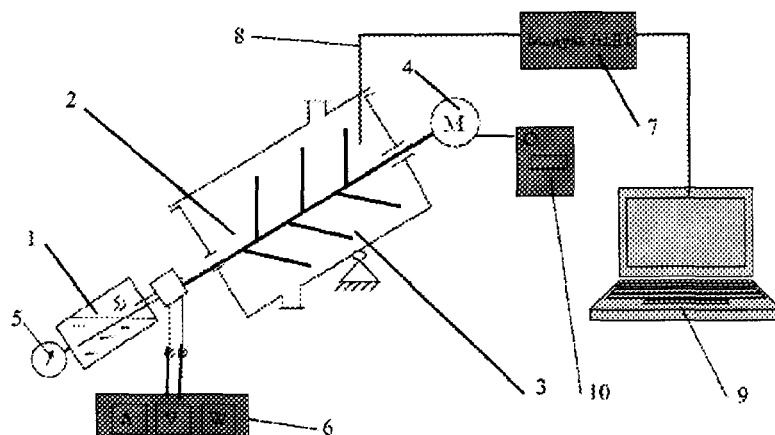
Сушилка с вращающимся термосифоном (рис. 1) состоит из корпуса 1, конденсатора 2, испарителя 3, привода 4. ВТС представляют собой герметично закрытую полость, частично заполненную теплоносителем.

При подводе теплоты к испарителю теплоноситель начинает кипеть, образующийся пар направляется в конденсатор, где конденсируется на стенках, отдавая теплоту фазового перехода охлаждающей среде. Пар перемещается за счет разности давления в испарителе и конденсаторе в результате уменьшения объема при конденсации пара. Конденсат под действием гравитационных сил движется в испаритель. Таким образом, в ВТС реализуется замкнутый испарительно-конденсационный цикл.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из парогенератора 1; конденсатора 2; корпуса 3; привода 4; манометра 5; измерительного комплекса К-50; аналого-цифрового преобразователя 7; термопары 8; компьютера 9; частотного преобразователя 10.

Медь - константановые термопары, отградуированные в диапазоне температур 0÷100 °С, размещены

в капиллярах из нержавеющей стали. Наружный диаметр капилляров 1 мм, длина термодатчика 50 мм. Термопары выполнены в виде термошупов и позволяют измерять температуру продукта в различных точках объема продукта. Спай термопары герметизировался и электролизовался тонким слоем эпоксидной смолы. Термопары коммутировались к АЦП.



1 – парогенератор; 2 – конденсатор; 3 – корпус; 4 – привод; 5 – манометр;
6 – измерительный комплекс К-50; 7 – АЦП; 8 – термопары;
9 – компьютер; 10 – частотный преобразователь

Рис. 1 – Схема экспериментальной установки

Величина электрического напряжения, подаваемого на нагреватель парогенератора, регулировалась и измерялась с помощью комплекса К-50.

Величина давления теплоносителя в конденсаторе ВТС контролировалась при помощи манометра МВРЗ-У.

Для модельных продуктов был выбран различный диапазон измеряемых величин (табл. 1).

Таблица 1 – Условия экспериментальных исследований

Продукт	На- клон ВТС, γ	Частота оборотов ВТС, п	Давление в конден- саторе ВТС, Р	Подводимая мощность	Влажность про- дуктов началь- ная, ω _н , %
	градус	мин-1	МПа	кВт	
Пшеница	30...45	14	0,05...0,15	0,8...1,5	20
Варёный горох					25
Амарант					20

Начальная влажность продуктов поддерживалась на уровне либо технологических требований, либо выбиралась из соответствующих таблиц.

Конечная влажность продуктов обычно выбиралась из таблиц как равновесная для данных атмосферных условий.

Температура поверхности конденсатора ВТС поддерживалась такой, чтобы не происходило перегрева продукта выше технологических требований.

Частота вращения конденсатора ВТС регулировалась при помощи частотного преобразователя типа Altivar.

Температуру зерна пшеницы измеряли при помощи медь-константановых термопар. Температуры измеряли в нескольких разных точках объема, после чего усредняли. Данные первичных преобразователей температуры поступали на АЦП, преобразовывались в цифровой сигнал и вводились в ПК. Интервал регистрации данных – 10 с. Температуру теплоносителя определяли по величине давления в конденсаторе сушилки. Интервал регистрации данных – 600 с. Зерно сушили до состояния несколько ниже равновесной влажности. Средняя влажность воздуха в лаборатории 80 %. Средняя температура зерна в опытах 60...80 °С. По данным [2] при таких условиях равновесная влажность зерна 14...16 %. Аппарат работал периодическом режиме. Единовременная загрузка аппарата составляла Gз=1,5 кг, средняя температура

воздуха в помещении $T_{ос} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, частота оборотов ВТС $n = 14\text{ об/мин}$.

При сушке от продукта F за единицу времени τ происходит унос некоторого количества влаги M при разности давлений ΔP это выражается уравнением (1):

$$\beta = \frac{M}{F \cdot (P_{пр} - P_v) \cdot \tau} \quad (1)$$

где: β – коэффициент массоотдачи;

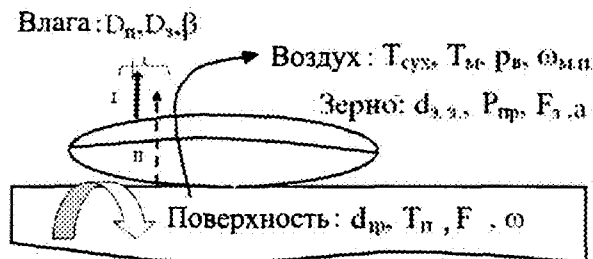
$P_{пр}$ – парциальное давление водяного пара над продуктом;

P_v – парциальное давление водяного пара в воздухе; τ – время процесса.

Коэффициент массоотдачи является не физической константой, а характеристикой, зависящей от физических свойств продукта и гидродинамических условий на границе раздела фаз (ламинарный или турбулентный режим течения), связанных, в свою очередь с физическими свойствами фазы, а также с геометрическими факторами. Таким образом, величина β является функцией многих, переменных, что значительно усложняет расчет или опытное определение коэффициентов массоотдачи. Коэффициент массоотдачи является аналогом коэффициента теплоотдачи в процессах переноса тепла.

Рассмотрим процесс сушки зерна в сушилке на базе ВТС (рис. 2). Параметр влажности зависит от времени. Процесс рассматриваем как квазистационарный. Моделирование усложняется тем, что имеет место две фазы. Первая – воздух, движущийся в межзерновом пространстве, вторая – объем зерна, внутри сушилки.

Эквивалентный диаметр зерновки d_z . Зерно перемешивается нагретыми трубками конденсатора. Диаметр трубок $d_{тр}$. Площадь поверхности конденсатора F . Температура поверхности конденсатора ВТС – T_n . Окружная скорость трубки модуля (ω).



D_n – коэффициент диффузии водяного пара в воздух; D_z – коэффициент диффузии влаги внутри зерновки; β – коэффициент массоотдачи; $T_{сух}$ – температура воздуха; T_m – температура мокрого термометра; P_v – давление парциальное насыщенного пара в воздухе; $\omega_{м.п.}$ – скорость воздуха в межзерновом пространстве; d_z – эквивалентный диаметр зерновки; $P_{пр}$ – давление пара над поверхностью материала; F_z – площадь зерна; a – коэффициент теплопроводности зерновки; $d_{тр}$ – диаметр трубок конденсатора ВТС; T_n – температура поверхности; F – площадь поверхности конденсатора ВТС, ω – окружная скорость конденсатора ВТС

Рис. 2 – Схема процесса сушки зерна в сушилке на базе ВТС

Зерновка нагревается за счет контакта с нагретой поверхностью модуля. Давление пара над поверхностью материала $P_{пр}$. Площадь зерна F_z .

Зерновку омывает поток воздуха. Воздух является влагонесителем. Воздух забирает в себя влагу и охлаждает зерно. В отличие от конвективных сушилок, в которых воздух нагревает зерно. Происходит диффузия водяного пара в воздух. Параметры воздушного потока: коэффициент диффузии водяного пара в воздух D_n ; скорость воздуха в межзерновом пространстве $\omega_{м.п.}$; температура воздуха $T_{сух}$; температура мокрого термометра T_m ; давление парциальное насыщенного пара в воздухе P_v .

Движущая сила процесса сушки в первом периоде – разность парциальных давлений водяного пара над продуктом и в воздухе ($P_{пр} - P_v$).

Таким образом, в первом периоде сушки, определяющими для массоотдачи будут условия на границе раздела фаз – режим движения воздуха снаружи зерновки, площадь зерновки, температура поверхности конденсатора ВТС.

Во втором периоде сушки происходит перенос влаги в стесненных условиях. Определяющий параметр – коэффициент диффузии влаги внутри зерновки D_z .

Интенсивность процесса массоотдачи напрямую связана с температурой нагрева зерна.

Степень нагрева зерна определяется его теплофизическими свойствами – коэффициентом темпера-

туропроводности (а), средней влажностью (ωср).

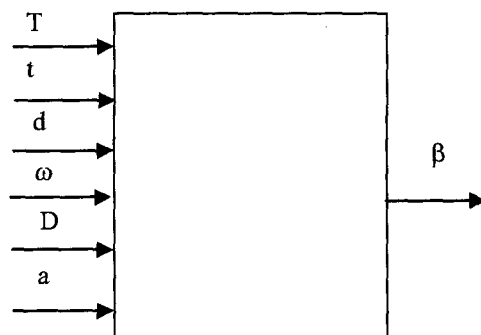


Рис. 3 – Параметрическая схема процесса массоотдачи при сушке в сушилке на базе ВТС

Для определения β составим параметрическую схему. В данном случае надежным способом получения структур критериальных уравнений является метод анализа размерностей (рис. 3) [3,4]. На основе его общих принципов устанавливаем вид критериального уравнения для расчета коэффициента массоотдачи β .

Коэффициент массоотдачи зависит от следующих параметров (рис. 4): температуры поверхности (Т), температуры зерна (t), определяющего размера (d), окружной скорости трубки модуля (ω), скорости диффузии (D), температуропроводности (а).

Допустим, что Т, d, ω, D, t, а имеют неиз-

вестные показатели степени $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ и запишем:

$$\beta = D^{k_1} \cdot d^{k_2} \cdot \omega^{k_3} \cdot T^{k_4} \cdot t^{k_5} \cdot a^{k_6} \quad (2)$$

Все эти параметры состоят из трех основных размерностей: длины (L), времени (τ), температуры (Т) (таб. 2). Размерности параметров, входящих в уравнение (2), известны, его можно записать:

$$(L \cdot \tau^{-1}) = (L^2 \cdot \tau^{-1})^{k_1} \cdot (L)^{k_2} \cdot (L \cdot \tau^{-1})^{k_3} T^{k_4} \cdot t^{k_5} \cdot (L^2 \cdot \tau^{-1})^{k_6} \quad (3)$$

Таблица 2 – Список параметров

Параметр	Символ	Размерность
Коэффициент массоотдачи	β	$L \cdot \tau^{-1}$
Температура	T	T
Размер частицы	d	L
Скорость	ω	$L \cdot \tau^{-1}$
Коэффициент диффузии	D	$L^2 \cdot \tau^{-1}$
Коэффициент температуропроводности	a	$L^2 \cdot \tau^{-1}$

Условия безразмерности данного выражения выводятся непосредственно из строки в размерной матрице.

Таблица 3 – Размерная матрица

	D	d	ω	T	t	a	Уравнение
T				k_4	k_5		$k_4 + k_5 = 0$
τ	$-k_1$		$-k_3$			k_6	$-k_1 - k_3 - k_6 = -1$
L	$2k_1$	k_2	k_3			$2k_6$	$2k_1 + k_2 + k_3 + 2k_6 = 1$

Решаем в символьном виде систему уравнений таблицы 3, подставляем в уравнение (3).

Группируя отдельные величины, получаем критериальное уравнение вида:

$$\frac{\beta \cdot d}{D} = \left(\frac{\omega \cdot d}{a} \right)^{k_3} \cdot \left(\frac{t}{T} \right)^{k_5} \cdot \left(\frac{a}{D} \right)^{k_6} \quad (4)$$

Таким образом, получено уравнение вида:

$$Nu_M = f \left[Pe, \left(\frac{t}{T} \right), \left(\frac{a}{D} \right) \right] \quad (5),$$

где $Nu_M = \frac{\beta \cdot d_k}{D}$ – число Нуссельта диффузионное;

$$Pe_T = \frac{\omega d}{\alpha} \quad - \text{число Пекле тепловое};$$

$$\left(\frac{t}{T}\right) \quad - \text{симплекс температур};$$

$$\left(\frac{a}{D}\right) \quad - \text{симплекс отвечающий за тепло- физические свойства материала и воздуха.}$$

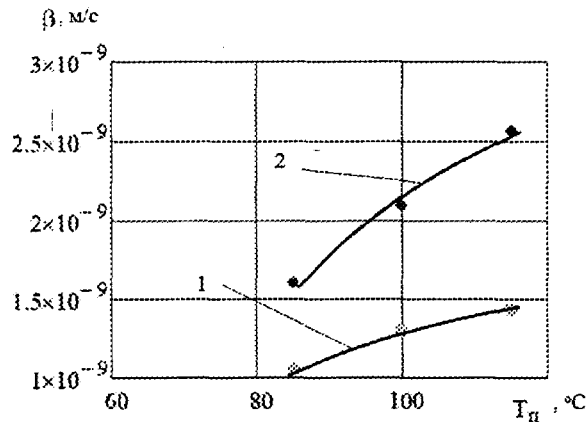
Согласно π – теореме получено 4 безразмерных комплекса (7 переменных, 3 основных размерности).

Неизвестные коэффициенты в уравнении (4) необходимо определить после обобщения экспериментальных данных.

Задача дальнейших экспериментальных исследований – обобщение полученных данных и определение констант в уравнениях в числах подобия.

Коэффициент массоотдачи получаем, используя основное уравнение массоотдачи применительно к первому периоду сушки. В таком случае, движущая сила – разность парциальных давлений над продуктом и в воздухе. В качестве исходных данных используем данные, полученные в результате экспериментов.

Изменение температуры поверхности приводит к росту коэффициента массоотдачи в 1,8 раза (рис. 4). Что связано с влиянием температуры поверхности на температуру зерновки и как следствие росту парциального давления пара над продуктом. Таким образом, увеличивается движущая сила процесса.



1 – при частоте оборотов $n=14$ об/мин; 2 – при частоте оборотов $n=28$ об/мин

Рис. 4 – Зависимость коэффициента массоотдачи от температуры поверхности ВТС

Изменение частоты оборотов ВТС приводит к росту коэффициента массоотдачи в 1,6 раза. Что связано с обновлением контакта фаз, повышением активной поверхности влагоотдачи за счет перемешивания объема зерна.

Необходимо учесть, как влияет скорость вращения ВТС на интенсивность нагрева зерна. Величина нагрева зерна будет определять скорость удаления влаги от зерновки в воздух. В число Пекле входит окружная скорость вращения трубки конденсатора ВТС. В нашем случае число Пекле отражает, как соотносится передача тепла к зерновому слою за счет конвекции, при вращении конденсатора ВТС, к передаче тепла за счет теплопроводности зернового слоя.

Число Нуссельта диффузионное отражает, как соотносится передача влаги за счет конвективных воздушных токов, к передаче влаги за счет диффузии влаги в воздух.

Полученная модель будет отражать влияние теплообмена на внешний массообмен. Далее необходимо определить степень влияния температуры поверхности ВТС на интенсивность массоотдачи. Рассчитываем симплекс T_3/T_n . Показатели степени в уравнении (6) получаем, используя приложение MS Excel.

$$Nu_M = \left[8.1 \cdot 10^{-9} \cdot Pe^{0.5} \left(\frac{T_3}{T_n} \right)^{0.4} \right] \quad (6)$$

Используя уравнение (6), сможем рассчитывать кинетические коэффициенты в процессе сушки, задаваясь различными режимными параметрами установки: частотой вращения ВТС, температурой зерна,

поверхности ВТС. Подставляем в полученное уравнение (6) значения скорости зернового потока и температуры из экспериментального диапазона. Получаем ряд расчетных значений числа Нуссельта $Nu_{мр}$. Сравниваем расчетные числа Нуссельта ($Nu_{мр}$) и полученные в результате эксперимента ($Nu_{м}$). Для этого строим график зависимости между расчетными числами Нуссельта и экспериментальными $Nu_{мр} = f(Nu_{м})$.

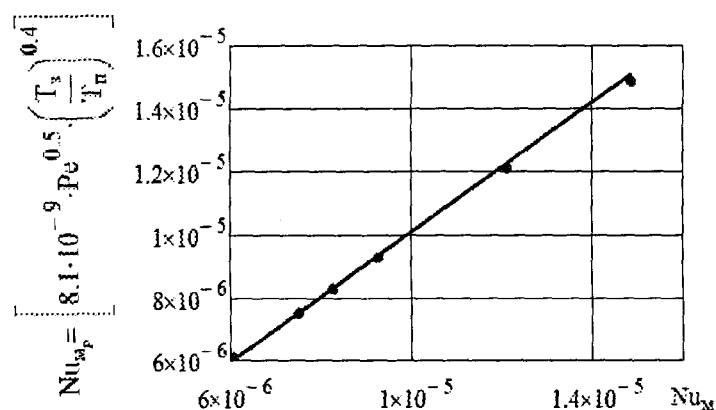


Рис. 5 – Зависимость между расчетными числами Нуссельта и экспериментальными $Nu_{мр} = f(Nu_{м})$.

Данные аппроксимируются линейной зависимостью, с коэффициентом $R^2=0,98$. Полученная модель с высокой точностью описывает полученные экспериментальные данные.

Литература

1. Современное состояние и тенденции развития мощностей по хранению зерна в хозяйствах Украины, Журнал «Хранение и переработка зерна» : <http://hipzmag.com/>
2. Атаназевич, В.И. Сушка зерна [Текст]: практ. пособие / В.И. Атаназевич - М.: Лабиринт, 1997. – 256 с.
3. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярнопористых телах [Текст] / А.В. Лыков– М.: Гостехиздат, 1954.
4. Бурдо, О. Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах [Текст] / О. Г. Бурдо, Л. Г. Калинин – О.: Друк, 2008. – 348 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМА КАПИЛЛЯРНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Зыков А.В., канд. техн. наук, доцент, Смирнов Г.Ф., д-р техн. наук, профессор
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

В статье рассматривается моделирование процессов сушки на основе совместного решения уравнений массоотдачи, фильтрации и диффузии влаги в пористом слое с учетом влияния механизма капиллярного торможения. В работе приведены результаты теоретических исследований первого периода сушки.

The drying processes simulation based on the joint solution of equation of mass transfer, filtration and diffusion of vapour through the porous layer considering the influence of capillary declination are overveiwed in the article. The results of the theoretical studies of the 1st period of drying are shown.

Ключевые слова: сушка, термосифон, моделирование, капиллярное торможение, теплоперенос.

1. Введение.

В обстоятельной монографии [1] приводится объективный анализ современных взглядов на закономерности процессов сушки. Приведем то, что пишет в [1], на эту тему автор: «Фундаментальные основы теории сушки сложились в середине прошлого столетия и базируются на работах А.В.Лыкова и П.А.Ребиндера [2,3]. Основываясь на этих положениях, развиваются несколько научных направлений в теории сушки. Аналитические исследования посвящаются моделям градиентного переноса и термодинамическим моделям. Феноменологическая модель А.В.Лыкова дополнена Луциком П.П. соотношениями для учёта деформации в материале [4]. Углубленный анализ кинетики сушки проводится в центре сушки ИТТФ под руководством А.А. Долинского [5]. В работах Ю.Ф. Снежкина и Н.И. Никитенко предложена оригинальная модель влагообмена [6]». Такая краткая характеристика дана автором [1] во введении. Далее в нём же приводится перечень многочисленных направлений экспериментальных исследований процессов сушки, их авторов и оценки их значимости. В завершении в этом Введении автор пишет: «В данной монографии [1], не ставилась цель глубокого исследования теории сушки. Стержневым вопросом была энергетика технологии обезвоживания продуктов». Таким образом, опираясь на приведенную информацию и её объективную оценку существующего положения в теоретическом анализе процессов сушки можно считать, что существующие взгляды и концепции на физическую природу и принципиальные внутренние механизмы процессов сушки нуждаются в углубленном подходе, вскрывающем сущность тех механизмов процесса, которыми объясняются главные его особенности. В настоящей работе авторами предпринимается попытка сделать в этом направлении свой шаг. Так как необходимо сравнение с данными опытов для объективной оценки справедливости предлагаемого подхода, то для этого использовались полученные под руководством проф. Бурдо О.Г. данные опытов по сушке зернового слоя. В предлагаемом подходе, как указано в названии, рассматривается сушка нагреваемого, но не деформируемого материала. Принимается, что нагрев осуществляется через контакт греющей поверхности с нагреваемым материалом. Эта схема отвечает реальным условиям опытов, результаты которых используются для сопоставления с расчётами по предлагаемой модели, а условия опытов изложены в [7,8]. Принципиальная схема подхода авторов состоит в следующем:

1. Принимается, что на первом этапе построения математических моделей процессов сушки следует сформировать ту часть общей структуры, в которой, на основе учёта типа источника энергии и тепловых связей с ним объекта сушки решаются проблемы расчёта нестационарных температурных полей в объекте. В рамках этого этапа также записываются условия равновесия на границах раздела фаз, т.е. на поверхностях испарения.
2. На следующем этапе формируются те части моделей, в которых на основе данных о структуре среды (пористость, размеры пор, их стабильность или не стабильность их и т.д.) записываются те уравнения, которые определяют режимы и законы движения массы удаляемой в процессе сушки влаги. При этом принимается, что в зависимости от типа объекта (сплошное пористое тело; слой зёрен; слой порошков; ткань; плёнка и т.д.) выбираются модели движения как для удаляемой влаги из внутренних поверхностей мини – или микро – каналов, так и из внутренних объёмов (в особенности для пищевых продуктов).
3. Далее записываются основные соотношения, связывающие распределения температур с величинами, которыми определяются «движущие силы» локальных процессов переноса массы. Принимается, что в пределах элементарных ячеек или объёмов, для определения массы удаляемой вла-

ги, допустимо использовать известные формулы массоотдачи, в которых присутствуют найденные величины «движущих сил», удельные поверхности испарения и коэффициенты массоотдачи. При этом формулы для расчёта локальных коэффициентов массоотдачи принимаются из известных или принятых критериальных формул. Этот элемент построения общей схемы расчёта содержит наибольший уровень неизвестности. Поэтому, авторы полагают, что вначале допустимы различные формы выбора этих расчётных формул, например, допуская аналогию с процессами переноса тепла и принимая необходимые расчётные формулы и др.

4. На завершающем этапе предполагается совместное объединение расчётных соотношений в некую единую общую модель и осуществление расчётных упражнений, в которых в качестве основной цели служит величина убыли влаги. При этом возможен различный уровень этой величины, в зависимости от требований технологии: (удаление заданного количества влаги, при котором не достигается полного осушения; более глубокий уровень осушения, при котором удаляется вся или почти вся влага с внутренних поверхностей структуры; полное осушение не связанное с удалением влаги принадлежащей материалу объекта; полное удаление всей влаги, включающей ту, что принадлежит самому материалу объекта и т.д.).
5. По результатам предыдущих этапов может возникнуть необходимость в корректировках соотношений в первоначальных этапах (1, 2 и др.) по результатам конечного этапа (4). Так, например, может оказаться необходимым в исходных уравнениях для расчётов нестационарных температурных полей, учитывать затраты энергии, связанные с испарением влаги и т.д. Проявится необходимость организации соответствующей процедуры последовательных приближений.

Авторы попытались осуществить этот подход, используя в качестве объекта слой зерна, который нагревается путём контакта этого слоя с внешней поверхностью вращающегося испарительного термосифона как [7,8].

2. Модели распределений нестационарных температур и связанных с ними «движущих напоров» массоотдачи при заданных условиях сушки.

Уравнение, определяющее изменение средней температуры нагреваемого слоя зерна заданных размеров, может быть получено как уравнение энергии при нестационарном нагреве системы, состоящей из греющего устройства (испарительный вращающийся термосифон имеющий массу и удельную теплоёмкость, а, также массу заправки теплоносителя и её теплоёмкость и теплоту фазового перехода), зернового слоя с своей массой и теплоёмкостью, в котором и осуществлялся процесс сушки. Это уравнение, на данном этапе расчёта, не учитывает затраты тепла на сам процесс сушки, так как для этого необходимо знание результата сушки (массы удалённой влаги в динамике), имеет следующий вид:

$$Q = (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) \cdot dt_1 / d\tau + \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3 \cdot dt_3 / d\tau + r \cdot V_2 \cdot d\rho_2 / d\tau \quad (1)$$

Между текущими значениями температур t_1, t_3 существует связь, определяемая условиями тепло – массопереноса в следующем виде:

$$t_1 - t_3 = \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3 \cdot dt_3 / d\tau / S_3 \cdot \lambda_3 / \sqrt{C_0 \cdot a_3 \cdot \tau} \quad (2)$$

Решение этого уравнения имеет следующий вид:

$$(t_1 - t_3) = (t_1 - t_3)_0 \cdot \exp(-2 \cdot \delta_3 / \sqrt{C_0 \cdot a_3 \cdot \tau}) \quad (3)$$

Здесь $(t_1 - t_3)_0$ – разность температур в начальный момент времени (температурный напор в начале процесса нагрева зернового слоя) между контактной поверхностью ИТС и прилегающим к нему перемещаемым за счёт вращения зерновым слоем. Совместное рассмотрение уравнений (1) и (3) приводит к следующей формуле:

$$\begin{aligned} dt_1 / d\tau = Q / [(M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) + \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3] - \\ - (t_1 - t_3)_0 \cdot \delta_3 / \sqrt{C_0 \cdot a_3 \cdot \tau} \cdot \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3 \cdot \exp(-2 \cdot \delta_3 \cdot \sqrt{C_0 \cdot a_3 \cdot \tau}) / [(M_1 \cdot C_1 + \\ + M_2 \cdot C_2) + \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3] \end{aligned} \quad (4)$$

Предварительные конкретные расчёты показали, что в начальные моменты времени эта формула может иметь такой вид:

$$dt_1 / d\tau = Q / [(M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2)] \quad (5)$$

Из этого следует, что весь начальный период сушки по этой технологии связан с нестационарным режимом нагрева, когда основные температуры греющей поверхности и зернового слоя будут изменяться во времени. Это обстоятельство следует учитывать в расчётах процессов массоотдачи. Следует также

в уравнении энергии учитывать затраты тепла, связанные с его отводом от внешних поверхностей ИТС в окружающую среду. Такой учёт приводит к следующему уравнению:

$$Q = (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) \cdot dt_1 / d\tau + \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot k_3 \cdot C_3 \cdot dt_3 / d\tau + \alpha_3 \cdot [t_1 - t_{oc}] \cdot S_{32} \quad (6)$$

здесь: $S_{32} = (1 - k_3) \cdot S_3$ – масштаб внешней поверхности ИТС, от которой отводится тепло в окружающую среду. Поскольку, как ранее отмечалось, можно пренебречь вторым слагаемым, то уравнение (6) становится заметно проще. Его решение принимает вид:

$$t_1 - t_{oc} = \frac{A_1}{B_1} \cdot [1 - \exp(-B_1 \cdot \tau)] \quad (7)$$

$$A_1 = Q / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) \quad B_1 = \alpha_3 \cdot S_{32} / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) \quad (8)$$

Следующим важным моментом построения эффективной модели расчёта распределения температур является анализ этого распределения в той части зернового слоя, в пределах которой осуществляется нагрев. Полагаем, что это та его часть, в пределах которой имеет место нагрев с учётом его нестационарного характера. Полагаем, что этому отвечает часть слоя толщиной равной:

$$\delta_0 = \sqrt{C_0 \cdot a_s \cdot \tau_i} \quad (9)$$

Существенным моментом являлась необходимость учёта перемешивания слоя при вращении. Было предположено, что это можно сделать по аналогии тому, как влияет турбулентное перемешивание на интенсивность переноса тепла в жидкостных турбулентных струях [13]. Нужная формула из [13] имеет такой вид:

$$a_s = a_0 + \varepsilon_0 \cdot W_{10} \cdot L \quad (10)$$

Для определяющего размера принято, что он равен полной толщине зернового слоя: $L = \delta_{30}$. Последняя рассчитывается как частное от деления всего объёма слоя на поверхность его контакта с греющей поверхностью ИТС. Система расчётных формул процесса нестационарной теплопроводности данной задачи имеет следующий вид:

$$T_{li} = T_{oc} + Z_{li} \cdot (T_{li} - T_{oc}) \quad (11)$$

$$Z_{li} = \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{Fo_{0i}}} \right) - \exp \left[\frac{\alpha_{22}}{\lambda_{\varepsilon\phi}} \cdot L_1 \cdot \left(\frac{a_{22}}{\lambda_{\varepsilon\phi}} \right)^2 \cdot a_s \cdot \tau_i \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{2\sqrt{Fo_{0i}}} + \frac{\alpha_{22}}{\lambda_{\varepsilon\phi}} \sqrt{a_s \cdot \tau_i} \right] \quad (12)$$

Знание температур в местах, в которых возможно испарение, даёт основы для расчётов парциальных давлений и определения «движущих сил» процессов массоотдачи. Ключевым служит следующее уравнение:

$$P_{li} = P_0 \cdot \exp(Z_{li}) \quad Z_{li} = (r / Rl) \cdot \left(\frac{1}{T_{oc}} - \frac{1}{T_{li}} \right) \quad (13)$$

3. Модели движения паровоздушной смеси из внутренних объёмов и процесса массоотдачи при испарении, реализующих сам процесс сушки.

Предполагается, что первоначальным источником удаления испарённой влаги является повышение давления в паровоздушной смеси под действием перепада давлений между избыточным давлением, возникающим как следствие испарения с влажной поверхности и давлением в окружающей тело внешней среде. Это движение можно рассматривать как «фильтрацию» паровоздушного потока из внутренних объёмов нагретой зоны, в которых имеет место испарение в окружающую среду. Предлагается при этом использовать известное уравнение фильтрации, отвечающее линейному закону Дарси и имеющему следующий вид:

$$W_{fi} = \frac{\Delta P_{\varepsilon i} \cdot K_{fi}}{S_{\varepsilon i} \cdot \mu_{\varepsilon i}} \quad (14)$$

Для определения проницаемости при известных данных по составу зернового слоя (размер зёрен, пористость слоя и пр.) допустимо пользоваться известными расчётными формулами Кармана – Козени или им подобными, имеющими следующий вид:

$$K_{fi} = \operatorname{const} \cdot \varepsilon_i^3 \cdot D_0^2 / (1 - \varepsilon_i)^2 \quad (15)$$

Для расчётов процессов массоотдачи при испарении внутри слоя необходимо определение коэффициентов массоотдачи. Как правило, такие зависимости не известны, а во многих случаях трудно определяемы. Авторы полагают, что на рассматриваемом ими этапе, зависимости можно найти из [11], используя имеющиеся формулы для процесса внутренней теплоотдачи.

Разумеется, что для расчётов массоотдачи изменятся формы и составы соответствующих чисел (критериев) подобия.

Характерная скорость движения в слое, погружённом во вращающийся греющий объём ИТС со скоростью вращения в n оборотов в минуту равна: $W_{\text{сл}} = \omega \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_0$

Поток массы в пределах «движущейся нагретой зоны» определяется из известного уравнения массоотдачи:

$$j_{E1} = \beta_p \cdot (P_W - P_{E1}) \cdot S_y \cdot (2 \cdot \delta_{bi} \cdot \pi \cdot D_i + \delta_{bi}^2) \cdot L_i \quad (16)$$

На основе положений изложенных в параграфах 2 и 3 сформирован алгоритм последовательного расчёта процесса сушки. Существенным дополнительными элементами этого расчёта являются процедуры, учитывающие как в самом процессе сушки, возникают механизмы, подавляющие интенсивность этого процесса, вызывающие **торможение**.

4. Модель формирования «капиллярного механизма торможения» процесса сушки.

Предполагается, что первый такой механизм связан с удалением влаги, находящейся на внутренней, но внешней поверхности испарения. В различных объектах этот механизм проявляется различным образом. В случае, который изучался авторами и относился к сушке слоя зерна, по представлениям авторов, испарение влаги с внешней поверхности зёрен приводит к снижению её объёма и, как следствие, к утонению соответствующей плёнки жидкости, что ведёт к её перемещению к узким местам слоя: к местам контактов отдельных зёрен. Так как это имеет место при испарении, то в этих местах контактов возникают «углубляющиеся» по мере испарения криволинейные границы раздела фаз пар + жидкость. При этом кривизна этих границ раздела возрастает, что ведёт к появлению существенного по величине «капиллярного давления» снижающего «движущую силу» процесса массоотдачи. Исходя из знания остатка поверхностной влаги, и предполагая, что в моменты времени, отвечающие ему, он распределяется, главным образом, в местах контакта элементов (зёрен) слоя, можно сделать оценку радиуса кривизны криволинейной границы раздела фаз, предполагая, что этот радиус связан с масштабом объёмов жидкости в местах её размещения кубическим законом, т.е. между этим объёмом и радиусом кривизны справедливо соотношение: $R_{0i}^3 \approx \text{const} \cdot V_i$. Знание этого радиуса позволяет вычислить отвечающее ему «капиллярное давление» следующим образом:

$$\Delta P_{\sigma i} = 2 \cdot \frac{\sigma}{R_{0i}} \quad (17)$$

Когда этот радиус кривизны становится близким к радиусам внутренних каналов среды, которая осушается (в данном случае это зёрна), тогда наступает переход к испарению влаги из внутренних каналов, этот процесс авторами не рассматривался по целому ряду причин: 1. В столь малых по размерам каналах движение паровоздушной смеси перестаёт быть сплошным, т.е. оно подчиняется закономерностям молекулярных течений; 2. На внутренних поверхностях этих каналов при испарении должны иметь место скачки температур и давлений; 3. Нам не известна необходимая исходная информация по таким расчётам, включая сведения о размерах этих каналов, их распределении и т.д. В дальнейшем, при необходимости, такие расчёты могут быть выполнены при условии, что нужная исходная информация получена и достаточно надёжна. Понятно, что анализ процесса удаления влаги из внутренних каналов станет источником своего механизма торможения. При этом возможны разнообразные физические причины возникновения и развития таких внутренних каналов. Они могут присутствовать во внутренних объёмах объекта изначально; могут возникать как результаты физических, биологических (для пищевых продуктов), химических или механических или различных комбинаций этих воздействий. Естественно, в каждом таком случае необходимы соответствующие исследования и изучение этих проблем с целью получения нужной исходной информации. Можно предполагать, что результаты названных исследований и развитие, на их основе анализа соответствующих процессов тепло массопереноса, приведут к обнаружению, отвечающих этим формам испарения, своих механизмов торможения процесса сушки. По названным выше причинам авторы ограничились расчётными исследованиями для режимов, в которых имеет место только испарение поверхностной влаги. Развернутый алгоритм и наиболее важные результаты их представлены ниже.

5. Алгоритм расчета процесса с учетом механизма капиллярного торможения

Алгоритм расчета основан на определении для каждого момента времени толщины прогретого слоя, в пределах которого происходит испарение, по формуле (9) и решении системы уравнений материального баланса, учитывающей следующие материальные потоки в прогретом слое — испарение с поверхности, фильтрация сквозь слой материала, молекулярная диффузия водяного пара и воздуха:

$$\begin{aligned}
 \frac{dG1}{d\tau} &= \beta [P_n - (P_{pv} + dP_{pv})] \cdot V \cdot S_y \\
 \frac{dG2}{d\tau} &= \frac{K_f}{\delta_{30} \cdot \mu} \cdot [(P_{sl} + dP_{sl}) - P_0] \cdot \rho_a \cdot S_y \cdot V \\
 \frac{dG3}{d\tau} &= \frac{D_{op}}{R_v T1} \cdot \frac{(P_{pv} + dP_{pv}) - P_{pv0}}{D_t - \frac{\delta_e}{2}} \cdot \pi \cdot L_t \cdot (D_t + 2\delta_e) \\
 \frac{dG4}{d\tau} &= \frac{D_{op}}{R_a T1} \cdot \frac{(P_{pv} + dP_{pv}) - P_{pv0}}{D_t - \frac{\delta_e}{2}} \cdot \pi \cdot L_t \cdot (D_t + 2\delta_e) \\
 dM &= dG1 - dG2 - dG3 + dG4 \\
 dM &= dM_a + dM_v \\
 dM_a &= -\frac{1}{1+x} dG2 + dG3 \\
 dM_v &= dG1 - \frac{x}{1+x} dG2 - dG3
 \end{aligned} \tag{18}$$

Учитывая, что: $P_{sl} = P_{pv} + P_{pa}$ $dP_v = \frac{R_v \cdot T1}{V_a} \cdot dM_v$ $dP_a = \frac{R_a \cdot T1}{V_a} \cdot dM_a$ $dP_{sl} = dP_a + dP_v$, система (18) может быть преобразована к виду

$$ZX28 \cdot dM_a^4 + ZX33 \cdot dM_a^3 + ZX34 \cdot dM_a^2 + ZX35 \cdot dM_a + ZX36 = 0 \tag{19}$$

корнем которого является изменение массы сухого воздуха в слое за время Δt . Решение уравнения 26 позволяет определить изменение массы водяного пара в прогретом слое и количество удаленной влаги

$$dG1 = \left[dG3 + dM_v - \frac{dM_a \cdot (M_v + dM_v)}{M_a + dM_a} \right] \tag{20}$$

Так как, изменение массы слоя происходит только за счет удаления влаги ($\Delta M = dG1$), то, используя зависимости 17-20 можно определить снижение движущей силы процесса испарения влаги с поверхности за счет капиллярного торможения. Это снижение движущей силы учитывается при расчете процессов в прогретом слое в следующий момент времени.

6. Основные результаты моделирования.

Результаты моделирования представлены на графиках. Как можно заметить, количество влаги на внешней поверхности уменьшается, что приводит к уменьшению радиуса кривизны на границе фаз, а это

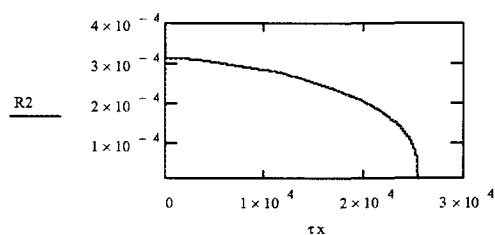


Рис. 1 – Изменение радиуса кривизны за время τx

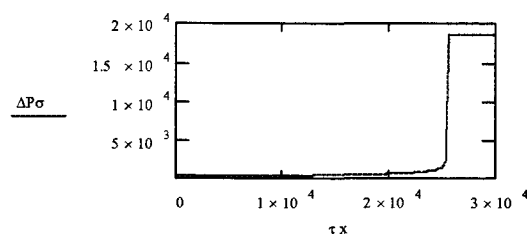


Рис. 2 – Изменение капиллярного давления за время τx

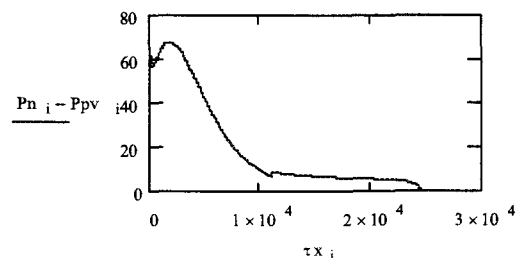


Рис. 3 – Изменение движущей силы за время τx

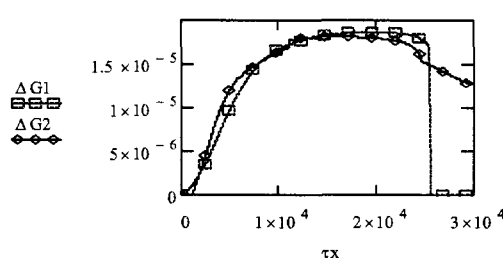


Рис. 4 – Изменение потока испарения $\Delta G1$ и фильтрационного потока $\Delta G2$ за время τx

сопровождается увеличением капиллярного давления и соответствующим снижением "движущей силы" переноса массы в этот момент. Это в свою очередь приводит к резкому сокращению скорости удаления влаги.

Выводы

1. Предложенный подход является новым шагом в описании внутренних механизмов процесса сушки. Он полезен для более глубокого анализа внутреннего механизма сушки.
2. Необходимо разработать подходы, связанные с испарением внутри некоторых внутренних мини или даже микро каналов в твердых средах.
3. Различные проблемы развития этого подхода и требуют проведение специальных экспериментов. Это может быть связано, например, с рядом важных проблем, таких как определение распределения количества влаги внутри материала, определение размеров внутренних микроканалов и их распределения по поверхности и так далее.
4. Основной целью исследования является не получение формул для технических расчетов, но, попытка лучшего понимания многих особенностей процессов сушки и на этой основе улучшение характеристик процесса.
5. Авторы также считают, что такой подход является новым способом построения общей теории различных процессов сушки.

Литература

1. Бурдо О.Г. «Эволюция сушильных установок», Одесса., 2010, — 368с.
2. Лыков А.В. «Теория сушки». М., Энергия, 1968г., — 472 с.
3. Ребиндер П.А. «О формах связи влаги с материалами в процессе сушки.», В кн. Всесоюзное научно – техническое совещание по сушке.,Проф.,1958, — С.286.
4. Луцик П.П. «Массопроводность деформируемого в процессе сушки твердого пористого тела.» Промышленная теплотехника.1987.Т.9.№5, С.29-34.
5. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. «Оптимизация процессов распылительной сушки», Киев. Наукова думка. 1984. – 240 с.
6. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. «Математическая модель и метод расчёта тепло-массопереноса и фазовых превращений в процессах сушки»././ «Промышленная теплотехника», 2001, Т.23,- №3. – С.65- 73.
7. Безбах И.В., Бурдо О.Г. Термомеханический агрегат для дисперсных продуктов // Наукові праці ОДАХТ. – 1999. Вип. 21. – С. 234–237.
8. Воскресенская Е.В. Особенности кинетики процесса сушки в термосифонно-механическом агрегате // – Одеса, – Наукові праці, –вип.37, –2010р., С.–81–84
9. H.F. Smimov, E.V. Voskresenskaya THE GRAIN LAYER DRYING APPROXIMATED MODEL // 8th Minsk International Seminar_Heat Pipes_Heat Pumps_Refrigerators_Pover Sources, –September12-15, – 2011, –Belarus, –Vol.2, –2011, – P.203-208
10. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.И. ««Сушіння зерна», Из –во «Либідь», 1997,352стр.
11. Горбис З.Р.«Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков»,Из – во «Энергия», Мос. 1970г. 424с.
12. М. Гинзбург А.С. и др. «Влага в зерне» 1969г. –224 с.
В.П.Исаченко «Теплообмен при конденсации»,Изво «Энергия», Мос. 1977 год. – 240 с.

УДК 577.3

ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ

Бошкова И.Л., канд. техн. наук, доц., Волгушева Н.В. канд. техн. наук, доц.
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Представлена методика расчета допустимого времени микроволновой обработки семян с целью их биостимуляции. На примере семян пшеницы твердой получено, что допустимая длительность обработки уменьшается с ростом влагосодержания и с увеличением начальной температуры зерна. Показано, что микроволновая обработка в режимах биостимуляции сопровождается одновременной дезинсекцией.

Method of calculation of permissible time of microwave treatment of seed is presented with the purpose of their bio-stimulation. On the example of seed of wheat is got, that possible duration of treatment diminishes with the increase of dryness and of settemperature of grain. It is shown, microwave treatment in the modes of bio-stimulation is accompanied by simultaneous fumigation.

Ключевые слова: биостимуляция, микроволновое поле, растительная клетка, семена зерновых, допустимое время, насекомые-вредители

Исследования влияния микроволнового электромагнитного поля на семена агрокультур доказали, что при определенных условиях микроволновой обработки наблюдается значительное усиление энергии всхожести и прорастания, повышение сопротивляемости к неблагоприятным факторам окружающей среды, и, в конечном счете, увеличению урожая [1,2]. Гипотеза возникновения эффекта биостимуляции рассмотрена в [3], согласно которой данный эффект связан с улучшением транслокации питательных веществ к зародышу вследствие повышения проницаемости растительной ткани. Для оценки расчетным путем длительности экспозиции в микроволновой камере составлена методика, основанная на представлении процессов преобразования микроволновой энергии во внутреннюю и на анализе ультраструктуры

растительных клеток. Естественную структуру растительной клетки можно рассматривать как замкнутый объем, а комбинация таких клеток образует более сложную систему, в которой клетки контактируют с межклеточным пространством, образующим общую систему капиллярных каналов. И клеточные стенки, и мембраны в целом радиопрозрачны. Основное содержимое клеток составляет вода и растворы веществ на ее основе. Около 5 % от массы мембран составляет вода в связанном состоянии. Клеточная стенка вместе с плазматической мембраной (плазмалеммой) образуют замкнутый полупроницаемый объем. Сама по себе клеточная стенка (как правило, композиции на основе целлюлозы) содержит в своей структуре достаточно хорошо проходимые каналы (плазмодесмы), которые сообщаются с межклеточным пространством или другими клетками. При среднем определяющем размере клетки $4 \cdot 10^{-5}$ м толщина клеточной стенки составляет $4 \cdot 10^{-7}$ м, диаметр каналов $10^{-7} \dots 10^{-8}$ м. Высокие прочностные свойства стенок определяются упорядоченностью молекулярных цепочек полимеров целлюлозы. Можно представить клетку как замкнутый объем, а система (ансамбль) клеток представляют собой структуру, которая объединяет множество замкнутых объемов. Основное сопротивление массопереносу из объема клетки за ее пределы (а, следовательно, и всему процессу экстракции) составляют плазматические мембраны (плазмалеммы), обладающие собственной устойчивой высокоупорядоченной структурой и функционально регулирующие массо- и энергообмен клетки с окружающей ее средой, размер (толщина) мембран растительных структур порядка 0,1 нм. Клеточная мембрана эластична, через нее осуществляется поступление питательных веществ и жидкости в клетку и вывод продуктов жизнедеятельности путем диффузии и осмоса.

На основании гипотезы определяющего влияния МВ поля на транспортные свойства растительной ткани, была создана методика, позволяющая оценить допустимое время воздействия МВ поля на обрабатываемый биологический материал. Представляется следующая схема протекания процессов в семенах при их МВ обработке. Вначале протекает квазиизобарный процесс в объеме растительной клетки. В то же время в замкнутых микрообъемах, содержащих молекулы воды, стремительно растет давление, что приводит к расширению микрофибрилл, вызывая увеличение проницаемости капиллярно-пористой структуры растительной ткани. При дальнейшем подводе МВ энергии, когда клетки уже не в состоянии увеличивать свой объем, начинается нарастание давления в цитоплазме, что в конечном счете приводит к нарушению целостности клеточных оболочек. Дальнейшее пребывание семян под действием МВ ЭМП приводит к перегреву, способного нарушить структуру белковых молекул, выносу жидкости и растворенных веществ под действием градиента температуры и давления за пределы зерна, карамелизации сахаров. Последние режимы являются недопустимыми.

В общем виде расчет предлагается проводить по следующему алгоритму.

1. Для каждой расчетной единицы определить максимально допустимый объем V_K - т.е. тот объем, который может быть достигнут при термическом расширении цитоплазмы.

2. Изменение температуры в процессе увеличения объема от V_0 до V_K определяется из соотношения: $\Delta t = \frac{V_K - V_0}{\beta V_0}$, где β - коэффициент температурного расширения воды с учетом влагосодержания расчетной единицы.

3. Определяется количество теплоты, поглощенной в этом процессе:

$$Q = Mc_p \Delta t + P \Delta V, \text{ Дж} \quad (1)$$

Для дальнейших расчетов с целью повышения точности рекомендуется пользоваться зависимостью, которая позволяет определить количество теплоты, затраченное на нагрев всего объема зерна массой M до расчетной температуры:

$$Q = M \cdot c \cdot \Delta t, \text{ Дж} \quad (2)$$

4. Время, в течение которого это тепло было получено:

$$\tau = Q / (q \cdot V), \text{ с;} \quad (3)$$

где V - объем материала, $q = 0.556 \cdot 10^{-10} \varepsilon' \cdot \tan \delta \cdot E^2$, Вт/м³.

В течение этого времени рост давления не будет представлять опасности для организма, и, если температура не достигает критического значения, семена проходят стадию биостимуляции.

Далее клеточные стенки (оболочки) не в состоянии увеличивать свой объем. Внутри объекта при дальнейшем подводе энергии МВ поля начинает резко расти давление. В целом же теплота идет на увеличение температуры тела и изменение давления согласно первому закону термодинамики:

$$Q = \Delta H - V \Delta P, \text{ Дж} \quad (4)$$

Связь температуры и давления можно задать только приближенно, т.к. уравнения состояния таких сложных смесей как цитоплазма не существует. В первом приближении расчет рекомендуется проводить, приняв свойства цитоплазмы равными свойствам воды.

Пользуясь этими зависимостями, были проведены расчеты, целью которых было определение температуры и давления в конце процесса обработки в зависимости от влагосодержания и времени воздействия. При расчете давления предполагалось, что оболочки тела жестко фиксированы клеточными стенками, т.е. случай, наиболее характерный для спор и склеротий. Расчет носит оценочный характер, однако позволяет предсказать реакцию биологического объекта на МВ-поле.

Объем растительной клетки зародыша зерна по данным [4] ориентировочно составлял $V_0 = 3,35 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$. Максимально допустимый объем клетки, оценка которого проведена по данным [4], составляет $V_k = 3,366 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$. Тогда изменение температуры:

$$\Delta t = \frac{V_k - V_0}{\beta \cdot \bar{V}} = \frac{0,016 \cdot 10^{-14}}{2,86 \cdot 10^{-4} \cdot 3,358 \cdot 10^{-14}} = 16,7^\circ \text{C},$$
 и при начальной температуре $t = 20^\circ \text{C}$ конечная температура составит $t_k = 36,7^\circ \text{C}$.

Теплоемкость зерна пшеницы определяется по зависимости:

$$c = 0,01[c_0(100 - w) + c_s \cdot w] \quad (5)$$

где w - влажность зерна, c_0 - теплоемкость сухого материала.

Для пшеницы с влажностью $w = 14\%$:

$$c = 0,01[1470(100 - 14) + 4200 \cdot 14] = 1852 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

При массе загрузки 1 кг теплота нагрева:

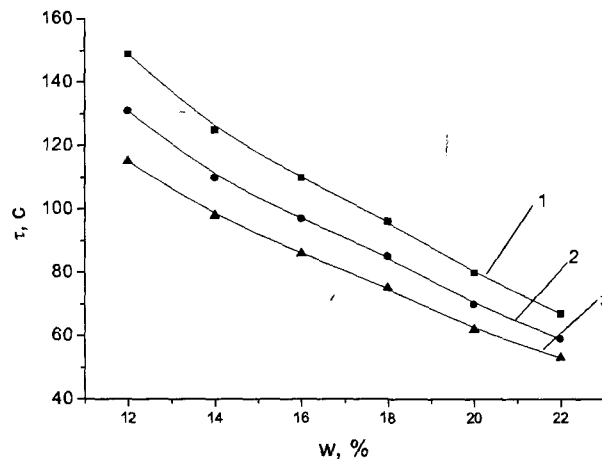
$$Q = M \cdot c \cdot \Delta t = 1 \cdot 1852 \cdot 26,2 = 48522 \text{ Дж}$$

Время, в течение которого это тепло было получено (мощность источника микроволнового поля – 1 кВт, объем загрузки камеры – $1,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$):

$$\tau = Q / (q \cdot \bar{V}) = 48522 / (489587 \cdot 1,15 \cdot 10^{-3}) = 86 \text{ с};$$

Аналогично рассчитываются данные для других значений. Ниже приведены результаты расчетов, полученные для описанных выше исходных данных при разных влагосодержаниях.

На рис. 1 представлены результаты расчета граничной кривой по времени обработки семян пшеницы в микроволновой камере при выходной мощности магнетрона 1 кВт в зависимости от влажности.



1 – начальная температура 10°C , 2 – начальная температура 15°C , 3 – начальная температура 20°C
Выходная мощность магнетрона – 1 кВт.

Рис. 1 – Допустимое время микроволновой обработки семян пшеницы в зависимости от влажности

Начальная температура материала оказывает существенное влияние на значение допустимого времени обработки, что связано с зависимостью от температуры диэлектрических характеристик и коэффици-

ента объемного (температурного) расширения. При расчете предполагалось, что начальная температура зерна и температура окружающей среды одинаковы.

При расчете учитывалось изменение диэлектрических характеристик в зависимости от влагосодержания. Для пшеницы твердых сортов эти значения, используемые в работе, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Диэлектрические характеристики зерна пшеницы твердой при различном влагосодержании ($t=+22\text{ }^{\circ}\text{C}$)

№ п/п	Влагосодержание u , %	ϵ'	$\text{tg}\delta$	ϵ''
1	13,0	7,81	0,23	1,80
2	14,0	8,57	0,24	2,06
3	16,1	9,04	0,26	2,35
4	17,2	9,34	0,27	2,52
5	19,2	9,86	0,28	2,76
6	22,0	10,8	0,30	3,24
7	24,3	13,7	0,28	3,84
8	25,4	15,6	0,27	4,12
9	27,5	17,3	0,28	4,84

Расчеты удовлетворительно коррелируются с результатами, полученными при лабораторных и полевых испытаниях семян [5].

Часто обрабатываемые семена содержат насекомых-вредителей и фитопатогены, влияние на которых микроволнового излучения будет различно. Для расчета повышения температуры каждый из биообъектов должен рассматриваться отдельно. Особенности этих объектов, учитываемые при проведении расчетов, приведены в табл. 2. Насекомые-вредители, влажность которых существенно выше, за время, в течение которого семена находятся в безопасной для своей жизнедеятельности области, нагреются до недопустимо высокой температуры.

Таблица 2 – Биологические объекты, подвергающиеся воздействию микроволнового поля

Биологический объект		
Фитопатогены	Семена	Насекомые-вредители
Спора, окруженная жесткой оболочкой гифа	Растительная клетка, окруженная клеточной стенкой	Насекомое как целое без учета его внутренней структуры

Температура насекомых-вредителей, достигаемая за заданный промежуток времени, определяется формулой:

$$t_n = q \cdot V_n \cdot \tau / (m_n \cdot c_n) + t_0 \quad (6)$$

где $m_n = 3,02 \cdot 10^{-6}$ кг (ориентировочный вес амбарного долгоносика). Электрофизические свойства насекомых при влагосодержании $W = 60\%$: $\epsilon' = 48$, $\text{tg}\delta = 0.33$; $W = 80\%$: $\epsilon' = 64$, $\text{tg}\delta = 0.25$. Из-за высокого влагосодержания термические эффекты развиваются очень быстро. Так, в течение 85 с (длительность выдержки семян с влажностью 12 %), и принимая $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура насекомых достигнет следующего значения:

$$t_n = 522600 \cdot 6,86 \cdot 10^{-9} \cdot 115 / (3,02 \cdot 10^{-6} \cdot 3200) + 20 = 63\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Результаты расчетов конечных температур, достигаемых при обработке семенного материала при длительности нахождения в МВ поле, определенной по изложенной выше методике, приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Влияние начальной температуры зернового материала на конечную температуру амбарного долгоносика

Начальная температура, $^{\circ}\text{C}$	Длительность обработки, с	Конечная температура, $^{\circ}\text{C}$		
		Амбарный долгоносик <i>Sitophilus granarius</i> .	Рисовый долгоносик <i>Sitophilus oryzae</i> L.	Зерновой шапель <i>Rh. dominica</i> F.
10	149	66	72	63
15	131	65	71	62
20	115	63	69	59

Из анализа результатов видно, что, когда в зерне при влажности 12% проходят стимулирующие процессы, одновременно осуществляется дезинсекция.

Расчет, проведенный для спор, показал, что, вследствие их низкого влагосодержания, микроволновое поле в режимах биостимуляции не оказывает на них губительное действие. Поэтому обработка семян, зараженных черной головней, не приводила к одновременной дезинфекции. Склеротии, влагосодержание которых значительно выше, могут получать повреждающий эффект.

Выводы

Представленная методика расчета допустимого времени выдержки семян в микроволновом поле позволяет количественно оценить длительность предпосевной обработки семян с целью их биостимуляции. Результаты расчета подтверждают предположение, что микроволновая биостимуляция сопровождается одновременной дезинсекцией зараженного зерна.

Литература

1. Nelson S.O. Use of microwave and lower frequency RF energy for improving Alfalfa seeds germination/ S.O. Nelson // J. Of Microwave Power, 1976. -Vol.11.- No.3.-P 271-277.
2. Предпосевная обработка микроволновым полем здоровых и зараженных фитопатогенами семян озимой пшеницы как фактор повышения урожайности / [Л.Г. Калинин, В.П. Тучный, Е.А. Левченко и др.] // Ж-л Хранение и переработка зерна, 2001. - № 8. -С. 23-28.
3. Калинин Л.Г. Физическая модель отклика растительной ткани на воздействие микроволнового электромагнитного поля / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова // Биофизика, 2003. – Т.48, вып.1. – С.122-124.
4. Атлас ультраструктуры растительных клеток. / Под ред. Козубова Г.М. и Даниловой М.Ф. Петрозаводск.: изд-во АН СССР Карельский филиал, 1972. 296 с.
5. Использование микроволнового поля для повышения урожайности полевых культур и защиты семян от вредителей и болезней / [Л.Г. Калинин, В.П. Тучный, Е.А. Левченко и др.] // Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. -Одесса, 2002. -Вып. 4.-С. 8-35.

УДК 664.048.5.022.63

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВЫПАРНОГО АППАРАТА НА БАЗЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТЕРМОСИФОНА

¹Безбах И.В., канд. техн. наук, доц., ²Омар Саид Ахмед, канд. техн. наук
¹Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина
²Giad Trucks co., Al Khartoum, Sudan

Рассмотрены аппараты на базе термосифонов для термообработки неньютоновских пищевых жидкостей. Приведены результаты экспериментальных исследований.

devices on the basis of thermosiphons for heat treatment of non-Newtonian food liquid are considered. Results of experimental researches are presented.

Ключевые слова: термосифоны, неньютоновские жидкости.

Пищевой промышленностью производится и перерабатывается значительное количество продуктов, тепловое и механическое поведение которых отличается от поведения обычных ньютоновских жидкостей. К группе пищевых неньютоновских жидкостей (ННЖ) относят томатную пасту, различные пюре, кефир, сгущенное молоко и др. Анализ свойств ННЖ показывает, что энергозатраты при их обработке значительно выше в сравнении с группой ньютоновских жидкостей. Основными проблемами, возника-

ющими при тепловой обработке ННЖ, являются: 1) изменение качества продукта в зависимости от продолжительности теплового воздействия; 2) процесс интенсивного накипеобразования. Высокая вязкость, плотность, низкая удельная теплоемкость и специфическое поведение ННЖ усложняют решение вышеупомянутых проблем традиционными методами интенсификации.

Для решения проблем термообработки пищевых ННЖ применяют термомеханические агрегаты (ТМА). Применение ТМА в пищевой промышленности достаточно обширно и позволяет значительно интенсифицировать процесс тепловой обработки, снизить энергозатраты, увеличить коэффициенты теплопередачи (таб. 1).

Таблица 1 – Области применения ТМА

Отрасль	Процесс	Продукт	Коэффициент теплопередачи
Консервная, молочная, виноделие [1]	Нагревание	Томатная паста, молоко, мезга	$K=950 \div 1000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$
Молочная, сахарная [2]	Охлаждение, кристаллизация	Сливки, сахарный раствор	$K=900 \div 1000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$
Консервная	Выпаривание	Томатная паста	-

Термомеханические агрегаты разделяют на циркуляционные и автономные. К автономным относится аппарат с вращающимся термосифоном [3].

Применение термомеханических агрегатов в пищевой промышленности позволяет реализовать следующие пути снижения энергозатрат: сокращение цепочки трансформации энергии; совмещение в аппарате нескольких технологических процессов; интенсификация тепломассообмена; эффективная доставка энергии к продукту; утилизация теплоты. Применение схемы с циркуляционным термомеханическим агрегатом позволяет значительно интенсифицировать процесс, применение ТМА с вращающимся термосифоном (ВТС) кроме интенсификации процесса уменьшает цепочку термотрансформации энергии.

ВТС представляют собой герметично закрытую полость, частично заполненную теплоносителем. При подводе теплоты к испарителю теплоноситель начинает кипеть, образующийся пар направляется в конденсатор, где конденсируется на стенках, отдавая теплоту фазового перехода охлаждающей среде. Пар перемещается за счет разности давления в испарителе и конденсаторе в результате уменьшения объема при конденсации пара. Конденсат под действием гравитационных сил движется в испаритель. Таким образом, в ВТС реализуется замкнутый испарительно-конденсационный цикл. Продукт поступает в корпус сверху, сталкивается с нагретой поверхностью конденсатора. Происходит сушка, перемешивание, либо нагревание продукта, после чего продукт выгружается через нижний патрубок в корпусе. Возможно выделить четыре основных направления применения аппаратов на базе ВТС. Это теплообменники, выпарные установки, сушилки, сушиллки с ТН.

С целью проверки работоспособности предложенных схемных решений применительно к процессу выпаривания ННЖ проведен ряд экспериментов. Задачей первого этапа экспериментальных исследований являлось получение термограмм и кинетики изменения сухих веществ (СВ) для различных ННЖ. В качестве ННЖ были выбраны: яблочное пюре, томатный сок.

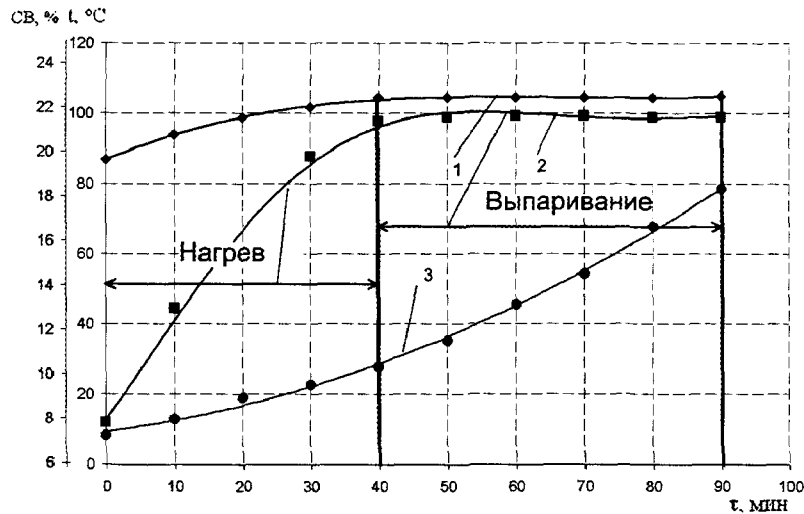
Уровень продукта в корпусе аппарата поддерживался постоянным. Давление P в испарителе и конденсаторе ВТС поддерживалось постоянным при помощи изменения подводимой энергии ($U=\text{var}$), таким образом поверхность конденсатора оставалась изотермичной. В процессе эксперимента изменяли угол наклона ВТС ($\gamma=\text{var}$), частоту вращения ВТС ($n=\text{var}$).

Концентрация при выпаривании яблочного пюре при частоте оборотов ВТС $n=14$ об/мин, и угле наклона $\gamma=30^\circ$ увеличивается, приближаясь к теоретической границе (рис. 1).

Концентрация увеличена с 7,3 до 18,4 % СВ. Концентрация изменяется по экспоненциальной зависимости. Период нагрева раствора (рис. 2) до температуры кипения около 40 мин. После чего следует испарение влаги с поверхности. Раствор кипит при атмосферном давлении. Наблюдается испарение влаги в период нагрева раствора до температуры кипения. Скорость удаления влаги в период нагрева в 2 раза ниже, чем во время интенсивного кипения раствора.

При изменении угла наклона ВТС с $\gamma=30^\circ$ до $\gamma=45^\circ$ период нагрева раствора до температуры кипения при прочих равных параметрах уменьшается в 2 раза [4].

При увеличении угла наклона ВТС улучшаются внутренние гидродинамические условия для возврата конденсата в испаритель ВТС. Соответственно уменьшается термическое сопротивление стенки конденсатора. Коэффициент теплопередачи возрастает. Интенсивное разрушение пограничного теплового слоя непосредственно поверхностью теплопередачи приводит к уменьшению внешнего термического



1 – температура поверхности ВТС; 2 – температура продукта; 3 – концентрация сухих веществ

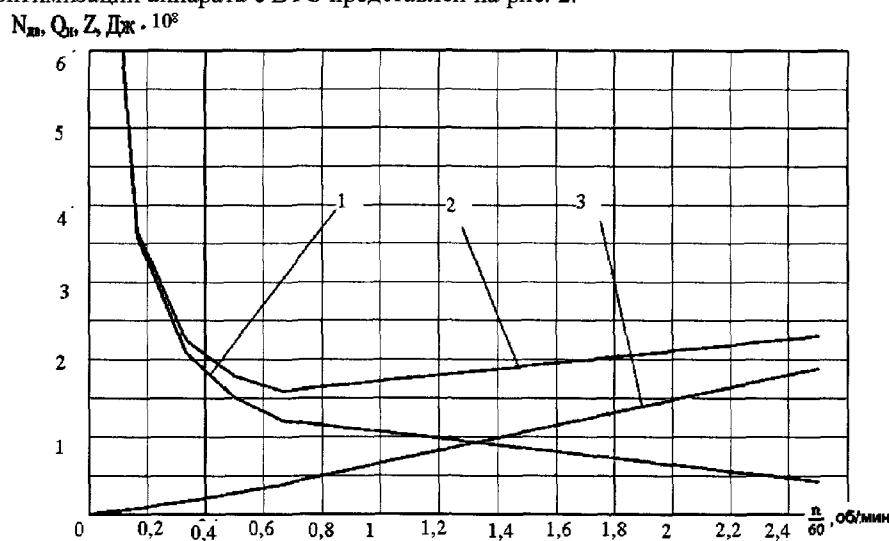
Рис. 1 – Изменение концентрации СВ и термограммы при выпаривании яблочного пюре, $n = 14$ об/мин, $\gamma = 30^\circ$

ВТС на интенсивность теплоотдачи к продукту показывают, что существуют две области изменения интенсивности теплоотдачи: рост коэффициентов теплоотдачи и автономность их значений. Дальнейшее увеличение частоты оборотов не приводит к росту интенсивности теплоотдачи. Вместе с тем при увеличении частоты оборотов ВТС возрастает потребляемая мощность двигателя. Кроме того, при увеличении частоты оборотов ВТС значения числа Фруда приближаются к критическим. Целью оптимизации является определение оптимальной частоты оборотов ВТС, при которой энергозатраты на процесс выпаривания будут минимальны (рис. 3).

Целевая функция представляет собой сумму энергозатрат на привод ВТС ($N_{дв}$) и энергозатрат на выпаривание (Q_n). Минимум целевой функции дает частоту вращения ВТС, при которой энергетические затраты на процесс будут минимальными.

Исходными данными для расчета по алгоритму являются: геометрические размеры ВТС, температуры продукта, теплоносителя, угол наклона ВТС, количество и концентрация исходного продукта

Результат оптимизации аппарата с ВТС представлен на рис. 2.



1 – расход энергии на выпаривание продукта; 2 – целевая функция Z; 3 – расход на энергии на привод ВТС

Рис. 2 – Оптимизация выпарного аппарата с ВТС

сопротивления. Возрастает коэффициент теплопередачи в зависимости от частоты оборотов ВТС. Теплота в раствор передается более эффективно. Интенсификация процесса теплообмена не оказывает влияния на температуру кипения раствора, а влияет на скорость испарения влаги из раствора. Скорость испарения влаги из раствора возрастает при увеличении частоты оборотов, угла наклона ВТС.

Определяющее влияние на интенсификацию теплообмена в процессе выпаривания яблочного пюре оказывает частота оборотов ВТС.

Полученные опытные данные, характеризующие влияние частоты оборотов

Минимум целевой функции приходится на $n=0,67 \text{ с}^{-1}$, что соответствует минимальному расходу энергии на процесс.

Внедрение аппарата с ВТС проведено на открытом акционерном обществе «Концерн Хлібпром» на линиях по термообработке вязких и дисперсных сред.

Литература

1. Дикис М. Я., Мальский А.Н. Технологическое оборудование консервных заводов. – М.: Пищевая промышленность, 1969. – 340 с.
2. Томбаев Н. И. Справочник по оборудованию предприятий молочной промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 280 с.
3. Патент України 97806 МКИ F26 В 3/06. Пристрій для теплової обробки неньютонівських рідин / Бурдо О. Г., Безбах І. В., Воскресенська О. В.; заявник і патентовласник ОНАХТ. - № у 2014 10091, опубл. 10. 04. 2015; Бюл. № 7.
4. Бурдо О. Г., Безбах І. В., Зыков А. В., Омар Саид Ахмед Повышение энергетической эффективности процессов обезвоживания пищевого сырья, Інтегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал .- Харків. НТУ «ХП», 2008.-№2.-172 с.

УДК 536.24-047.58:621.3.049.77

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В МИКРОСТРУКТУРАХ

Косой Б.В., д-р техн. наук, профессор

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Охлаждающие радиаторы на основе микроструктурных элементов реализуют инновационную технологию эффективного теплоотвода для миниатюрных объектов, характеризующихся высокой плотностью тепловыделения (например, микроэлектронные чипы, микросхемы, биологические ткани и т.п.). В работе обсуждаются наиболее значимые, с точки зрения автора, актуальные исследования, посвященные моделированию потоков жидкости и теплоты в микроструктурах на примере микроканальных и микропористых теплоотводов.

Heat sinks based on microstructural elements employ an innovative technology for efficient heat removal from miniature objects characterized by the high-density heat fluxes (for example, microelectronic chips, biological tissues, etc.). Present paper discusses the most important, from the author point of view, recent studies devoted to the modeling of fluid flow and heat transfer in the microstructures based on the examples of micro-channel and microporous heat sinks.

Ключевые слова: микроканал, пористая среда, фазовый переход, моделирование, теплообмен

Введение

Управление тепловыми режимами является ключевым аспектом в разработке новейших систем микроэлектроники и способствует прогрессу в сфере производства современных компьютеров и радиоэлектронных систем.

Небольшие размеры теплоотводящих устройств и очень жесткие эксплуатационные требования к рабочим температурам делают терморегулирование микроэлектронных устройств сложной задачей. Различные методы охлаждения, такие как распыление жидкости и тепловые трубы, применяются для эффективного отвода теплоты, как от одиночного устройства, так и от системы в целом. Использование микроканальных радиаторов является перспективной альтернативой традиционным методам охлаждения, которая может обеспечить более эффективный теплоотвод при существенно меньшем объеме системы охлаждения. Также существует возможность интеграции системы непосредственно в тепловыделяющее устройство. Две важных задачи в области терморегулирования, а именно снижение максимальной температуры и минимизация температурных градиентов на поверхности устройства, могут быть эффективно решены с помощью микроструктурных радиаторов.

В результате ряда исследований возможность достижения тепловыделения до 1000 Вт/м^2 при максимальной температуре поверхности менее 120°С привела к использованию микроканалов для охлаждения высокопроизводительных систем. Ряд исследований сфокусированы на понимании основ микропотоков,

сравнении и сопоставлении характеристик движения и теплообмена в микроканалах с традиционными каналами.

Проблемой численного моделирования является то обстоятельство, что модель не гарантирует точного совпадения с естественным течением процессов. Из-за допущений, используемых для упрощения модели и ее решения, существует вероятность ошибки и получения неточного результата. Тем не менее, тщательный анализ результатов моделирования и их сравнение с экспериментальными данными может выявить возможности той или иной модели. Результаты, полученные на основе численного моделирования с применением коммерческих пакетов, показывают приемлемую точность по сравнению с экспериментальными данными и другими подходами к моделированию [1].

1. Моделирование однофазных потоков. Samalam [2] моделировал конвективный теплообмен в потоке воды через микроканалы, выполненные в кремниевом основании. Задача была сведена к квазидвухмерному нелинейному дифференциальному уравнению, упрощенному при определенных физических условиях. Оптимальные размеры (ширина и шаг ребер) были определены аналитически для наименьшего термического сопротивления. Решение показало, что оптимизация размеров для канала с малым соотношением сторон более важна, чем при больших соотношениях. Однако, пренебрежение зависимостью теплофизических свойств жидкости от температуры может привести к значительной ошибке особенно для случая микроканалов.

Iwai и Suzuki [3] численно исследовали влияние на теплообмен разрежения и сжимаемости потока в микроканале с учетом скорости скольжения на всех стенках и температурного скачка на нагреваемой стенке. Авторы обнаружили, что сжимаемость имеет значение для микроканалов при разрывах потока, при увеличении числа Кнудсена. При этом значительного влияния температурного скачка на распределение числа Нуссельта не было обнаружено.

Toh и др. [4] численно исследовали трёхмерный поток жидкости и теплообмен в нагреваемых микроканалах. Уравнения постоянного ламинарного потока и теплообмена были решены методом конечных объемов. Численное решение было проверено сравнением местных температурных сопротивлений с доступными экспериментальными данными. Также в работе был рассчитан коэффициент трения. Было установлено, что с подводом теплоты потери на трение уменьшаются, особенно при низких значениях числа Рейнольдса. Также, при низких числах Рейнольдса температура воды возрастает, что приводит к уменьшению вязкости и, следовательно, к уменьшению потерь на трение.

J. Li и др. [5] провели анализ теплообмена при вынужденной конвекции в кремниевом микроканальном теплообменнике, используя упрощенную трехмерную модель сопряженного теплообмена (2D поток жидкости и 3D теплообмен), состоящего из 10-ти миллиметрового кремниевого основания с прямоугольными микроканалами, имеющими ширину 57 мкм, высоту 180 мкм и гидравлический диаметр 86 мкм. Влияние геометрических параметров канала и теплофизических свойств жидкости на поток и теплообмен было исследовано на основе температурной зависимости теплофизических свойств. Профиль скоростей, полученный при моделировании, сравнивался с приближенным теоретическим решением (1), что позволило сделать вывод о хорошей сходимости результатов, рис. 1.

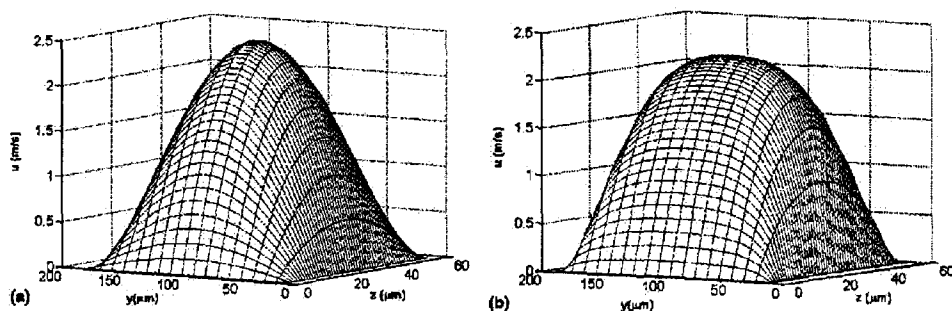


Рис. 1 – Сравнение двумерного поля скоростей (а), полученного численным решением и приближенным теоретическим решением (б)

$$u(y, z) = \frac{9}{4} u_m \left[1 - \left(\frac{y}{H/2} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{z}{W/2} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где u_m – средняя скорость потока, y, z – координаты точки в сечении канала, H, W – высота и ширина канала.

$$Nu = 4.1 + \frac{0.14 \cdot (D_h / L) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0.05[(D_h / L) \cdot Re \cdot Pr]^{\frac{1}{4}}} \quad (2)$$

где D_h – эквивалентный диаметр канала, L – длина канала, Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля.

Число Нуссельта, полученное при решении дифференциальных уравнений, было сопоставлено с эмпирическим выражением (2), рис. 2. Результат показал, что свойства жидкости могут значительно влиять на интенсивность теплообмена в микроканальном радиаторе.

Zhao и Peterson [6] представили аналитическое и численное исследование теплообменных характеристик при вынужденной конвекции в микроканалах. Были изучены влияние соотношения сторон канала и эффективного коэффициента теплопроводности на критерий Нуссельта для радиатора: при увеличении соотношения сторон и уменьшении теплопроводности число Нуссельта возрастает.

Используя воду в качестве рабочей жидкости, в работах [7,8] был исследован теплоперенос в микроканальном радиаторе с помощью трёхмерного численного анализа потока жидкости и теплообмена в прямоугольных микроканалах, основанного на методе конечных разностей. Микроканалы имели ширину 57 мкм и длину 180 мкм. Было показано, что повышение температуры вдоль оси потока носит линейный характер.

Li и др. [9] исследовали теплообмен деионизированной воды в прямоугольных микроканалах с различным гидравлическим диаметром в диапазоне изменений числа Рейнольдса 300...3500. Радиатор был выполнен из десяти медных микроканалов. Используя стандартный коммерческий численный код, авторы предложили модель для трехмерного сопряженного теплообмена в микроканальном радиаторе с учетом конвекции и теплопроводности в подложке.

Lior [10] представил численное моделирование и экспериментальное исследование микроканального радиатора для охлаждения электронных устройств. Прогнозирование температурного поля в микроканальном радиаторе было выполнено с помощью модуля CFD программного пакета Fluent.

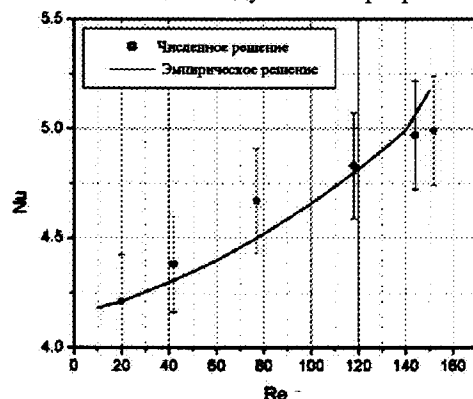


Рис. 2 – Сравнение чисел Нуссельта при моделировании и эмпирическом расчёте

Cheng и др. [11] численно исследовали характеристики потока жидкости и теплообмен при смешанной конвекции в прямоугольном канале с четырьмя тепловыми источниками. Для получения зависимости между давлением и скоростью использовался алгоритм SIMPLEC. Авторы изучали влияние четырех параметров: числа Ричардсона, расположения тепловых источников, высоты канала и угла наклона. Было установлено, что интенсивность конвективного теплообмена определяется не только полями скоростей и температуры, но и синергией между ними.

Lee и др. [12] разработали сопряженную (двумерную для потока жидкости и трехмерную для теплопереноса) модель теплообмена в кремниевом микроканальном радиаторе. Численный код конечных разностей для решения основных уравнений был разработан с использованием алгоритма трехдиагональной матрицы.

Issam Mudawar и Weilin Qu [13] предложили трёхмерную модель и провели численный анализ процесса теплопереноса и движения жидкости в кремниевом прямоугольном микроканальном радиаторе и дали описание локальных и усредненных значений температуры, теплового потока и числа Нуссельта. Также было рассмотрено влияние числа Рейнольдса и теплопроводности твердого основания на процесс теплопереноса. Основным исследуемым гидродинамическим параметром был коэффициент трения, а характеристикой теплообмена – термические сопротивления на входе и выходе канала. На рисунке 3 приведены сравнения коэффициента трения и термических сопротивлений, полученных численно в данной работе, с экспериментальными данными Kawano и др [14].

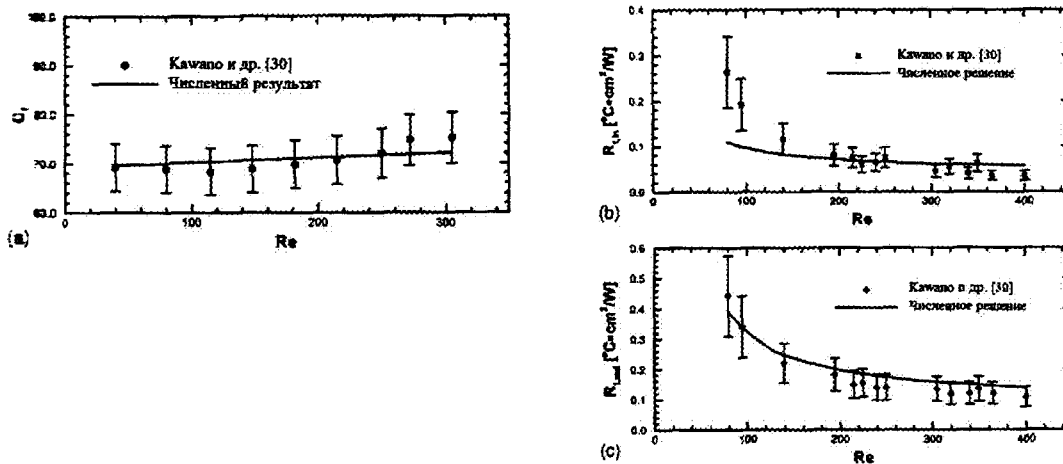


Рис. 3 – Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными Kawano и др. [14] для (а) коэффициента трения, (б) термического сопротивления на входе и (с) на выходе

Lee и др. [12] разработали сопряженную (двумерную для потока жидкости и трехмерную для теплопередачи) модель теплообмена в кремниевом микроканальном радиаторе. Численный код конечных разностей для решения основных уравнений был разработан с использованием алгоритма трехдиагональной матрицы.

Fedorov и Viskanta [15] предложили трехмерную модель для исследования потока жидкости и сопряженного теплового потока в микроканальном радиаторе. Для решения сопряженной задачи было использовано уравнение Навье-Стокса для движения несжимаемого ламинарного потока.

Автором работы [16] впервые реализованы комплексные экспериментальные исследования влияния шероховатости и пористости микроканальной поверхности на интенсивность теплообмена при кипении, а также установлен характер влияния неоднородностей различной природы на двумерные и трехмерные температурные поля в микроканалах различной геометрии.

2. Моделирование процессов переноса в микропористых средах. Ferrell и Alleavitch [17] моделировали пористую структуру с помощью частиц Монеля, размещенных на плоской стальной нагреваемой поверхности. Полученная структура имела равномерную пористость, равную $\epsilon=0.4$, с переменным количеством пор на единицу объема. Проницаемость колебалась от $10.96 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ до $411.56 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. Высота полученной структуры варьировалась от 3.2 мм до 38.1 мм. Пористый депозит был затоплен водяной колонной с постоянной высотой 76.2 мм.

Теоретический анализ процесса кипения в данной пористой структуре основывался на двух положениях: (1) проницаемость пропорциональна гидравлическому давлению структуры и (2) высота капиллярного напора является функцией силы поверхностного натяжения. Хорошее соответствие с экспериментальными данными для обеих вышеупомянутых величин давало возможность предположить, что частицы образуют правильную кубическую форму в пористой структуре. Основываясь на наблюдениях за процессом кипения в структуре, авторы предположили, что проводимость через тонкий слой насыщенной жидкости, находящейся в контакте с поверхностью нагрева, является основным механизмом теплопередачи. Численное решение трехмерного уравнения теплопроводности было получено с учетом следующих допущений:

1. Теплоперенос осуществляется через тонкий слой жидкостного покрытия погруженной частицы, находящейся в контакте с нагреваемой поверхностью. Толщина этого слоя определяется расположением пор наименьшего диаметра, полученных в результате формирования ряда частиц, прилегающих к нагреваемой поверхности.
2. Вся подводимая теплота расходуется на испарение жидкости, которое начинается с мениска пор наименьшего диаметра.
3. Межфазная поверхность, на которой происходит испарение, может быть описана кривой одного радиуса.
4. Температура на границе раздела фаз равна температуре насыщения при давлении в структуре.
5. В контакте с нагреваемой поверхностью частицы формируют правильные кубические ячейки.
6. Температура нагреваемой поверхности постоянна для всей поверхности.

В работе не представлено в явном виде уравнение теплопроводности с необходимыми граничными условиями. На основании расчёта была получена следующая зависимость коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = C/D_p \quad (3)$$

Это приводит к линейному увеличению плотности теплового потока приросте разности температур:

$$q = C \cdot D_p^{-1} \cdot (T_s - T_{sat}) = C \cdot D_p^{-1} \cdot \Delta T_{sl} \quad (4)$$

Moss и Kelly [18] предложили две модели для расчёта толщины парового слоя в фитиле испарителя тепловой трубы. Предполагалось, что паровой слой формируется между поверхностью контакта с пористым слоем и стенкой тепловой трубы. В первой модели изменение давления в жидкостном слое в зоне охлаждения тепловой трубы рассчитывается согласно закону Дарси, предполагая, что теплота, переданная жидкости, расходуется на ее испарение у верхней поверхности слоя. Предполагается, что теплота переносится через паровой слой путём теплопроводности, а перегрев жидкости на межфазной поверхности выше, чем прирост температуры насыщения за счёт повышения капиллярного давления. Основываясь на таких предположениях, толщина паровой плёнки определяется из выражения:

$$\delta_g = \delta - \frac{KRT_{sat}^2}{qh_g p_{sat}} \left(\frac{4\sigma_{lg} \cos \varphi}{D_p} - \rho_l g L_1 \sin \theta - \frac{q\mu_l L_1 L_2}{h_{lg} \rho_l K \sigma} \right), \quad (5)$$

где L_1 – длина участка трубки, по которой жидкость движется к испарительной секции, L_2 – длина испарительного участка, φ – угол смачивания и θ – угол наклона трубки к горизонту.

Во второй модели перепад давлений для жидкостного слоя рассчитывается по закону Дарси, как и в предыдущей. Предполагается постоянная толщина паровой плёнки, а пар покидает пористый слой только по краям. Толщина парового слоя измерялась методом нейтронной радиографии. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования представлены на рисунке 4. Как видно, несмотря на значительные расхождения, вторая модель позволяет получить более качественные представления. Неточность могла быть вызвана сильным упрощением модели теплопереноса в пористой среде, где предполагалось, что вся теплота направлена на испарение плёнки и теплообмен осуществлялся исключительно теплопроводностью без учёта конвективной составляющей.

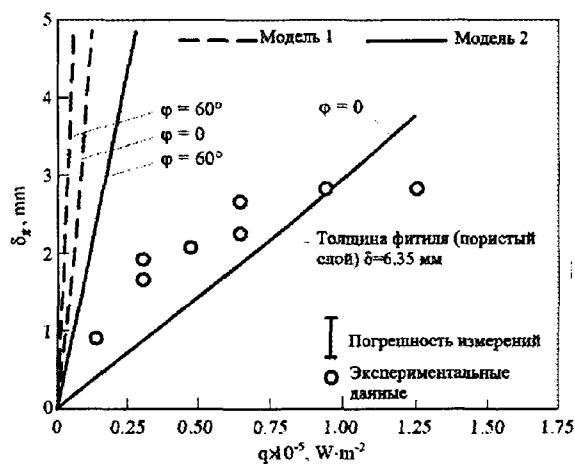


Рис. 4 – Зависимость толщины паровой плёнки от теплового потока

Nishikawa и др. [19] предложили две различные модели кипения в капиллярно-пористых структурах из спечённых порошков. Первая модель основана на анализе парового потока через пористый слой. Предполагается, что пар остаётся в нижней части слоя, который плотно прилегает к нагреваемой поверхности, перегревается и, соответственно, создает перепад давления в слое. Совместное рассмотрение уравнений Берка-Пламмера, описывающего перепад давления в слое, и Клапейрона даёт

$$q = \sqrt{\frac{4\varepsilon^3 d_{gm} \rho_g^2 h_{lg}^3}{7(1-\varepsilon)\delta} \ln \frac{T_s}{T_{sat}}} \quad (6)$$

Тепловой поток q , рассчитанный по уравнению (6), имеет величину примерно в сто раз превосходящую экспериментальное значение.

В другой модели, авторы предположили, что из-за малого числа Рэлея свободная конвекция при кипении в пористом слое незначительна. Теплообмен от поверхности нагрева к жидкости происходит за счёт одномерной теплопроводности. Расчёт коэффициента теплопроводности основан на пористости слоя и выполняется по следующей зависимости:

$$\lambda_m = \varepsilon \lambda_1 + (1 - \varepsilon) \lambda_s \quad (7)$$

Отсюда, тепловой поток рассчитывается из выражения:

$$q = \lambda_m \delta^{-1} (T_s - T_{sat}) \quad (8)$$

Хотя это выражение имеет довольно простой вид, но оно даёт неплохую оценку зависимости теплового потока на нагреваемой поверхности. Результат хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Nakayama и др. [20] представили комплексную модель процесса кипения для пористой поверхности Thermoexcel-E. Этот тип пористой структуры характеризуется малыми открытыми соединениями внутренних каналов, окружённых жидкостью и большим количеством каналов внутри структуры. Данная модель теплообмена соответствует циклическому процессу роста пузырьков и их отрыва. Считается, что теплопередача происходит двумя механизмами: внешняя конвекция и внутреннее испарение жидкостной плёнки. Процесс внешней конвекции происходит за счёт отрыва паровых пузырей и приводит к перемешиванию жидкости. Микрослой жидкости покрывает внутреннюю поверхность канала, испаряется, и теплота парообразования уходит с паровыми пузырьками из структуры через поры. Испарение на внешней поверхности пренебрежительно мало по сравнению с конвекцией внутри канала.

Webb и Haider [21] разработали аналитическую модель теплообмена при кипении для всех типов поверхностей с пористым покрытием, в которых основной геометрической структурой являются подповерхностные туннели. Модель описывает процесс кипения внутри капиллярно-пористой структуры и не содержит экспериментальных констант за исключением постоянной в выражении для определения диаметра пузырька. Ключевое предположение модели заключается в том, что туннель внутри увеличивающегося слоя создаёт поочерёдное поле с жидкостью и паром. Авторы полагают, что полный тепловой поток представляет собой сумму теплового потока, идущего на испарение внутри туннеля, и теплообмена конвекцией и теплопроводностью к однофазной области на внешней (верхней) поверхности.

Zhang и Zhang [22] предоставили теоретическое объяснение зарождения гистерезиса в микропористых поверхностях (капиллярно-пористых структурах). Авторы предположили, что поры имеют форму перевёрнутого конуса, в которых находится остаточное количество пара или инертного газа, которое до начала кипения не в состоянии покинуть слой, несмотря на значительный перегрев поверхности. Это происходит из-за следующих факторов: статического давления жидкости, высокого сопротивления потока через пористую структуру и капиллярных сил. Увеличение перегрева приводит к аккумуляции большого количества пара в пористом покрытии. Когда давление увеличивается, часть пара выходит из пористого покрытия, что приводит к падению давления в некотором количестве жидкости. В работе изучено влияние смачиваемости, переохлаждения жидкости и структурных параметров пористого покрытия.

Hanlon и Ma [23] выполнили теоретический анализ и экспериментальное исследование с целью определения характера тонкоплёночного испарения. Двумерная модель, включающая теплопроводность, капиллярный предел и начало пузырькового кипения, была разработана для прогнозирования общей способности теплопереноса в фитилях спечённой структуры. Численный результат показал, что возможно содействовать испарению тонкой плёнки с поверхности фитиля, выбрав подходящий размер частиц, пористость и толщину. При уменьшении среднего радиуса частицы, коэффициент теплопередачи при испарении может быть увеличен. Кроме того, можно определить оптимальную характерную толщину для обеспечения максимального теплоотвода. Для верификации результатов теоретического анализа было проведено экспериментальное исследование с целью определения характера теплообмена при испарении на верхней поверхности фитиля. Эксперимент показал, что теоретическое прогнозирование показывает завышенный результат. Однако, качественный анализ позволяет утверждать, что тонкоплёночное испарение на верхней поверхности фитиля играет важную роль в теплообмене при испарении. Отсутствие тонкоплёночного испарения на поверхности фитиля приводит к значительному снижению возможности теплопереноса. Результаты исследования полезны для оптимизации характеристик теплообмена в спечённых пористых средах тепловых труб и способствуют лучшему пониманию процесса тонкоплёночного испарения.

Czikk и O'Neil [24] предложили две различных модели, описывающие кипение на поверхностях с пористыми структурами. Авторы считали, что микропористая поверхность может быть представлена в виде слоя сферических частиц. Именно для такой геометрии капиллярнопористых структур проводились численные эксперименты. Для создания первой модели были сделаны следующие допущения:

- пузырьки пара образуются в свободном пространстве между твёрдыми элементами внутри пористого слоя, а жидкость протекает через те участки, где не происходит парообразования;
- пар образуется из-за испарения жидкости в микрослое, покрытом слоем твёрдых элементов;
- общий перегрев жидкости, необходимый для начала испарения, равен сумме перепада температур, вызванных теплопроводностью через плёнку жидкости и равновесного перегрева, являющегося характеристикой межфазной парожидкостной поверхности:

$$\Delta T_{sl} = \Delta T_{sat} + \Delta T_l; \quad (9)$$

- эффектами, вызванными увеличением плотности паровых зародышей внутри пористого слоя по отношению к гладкой поверхности, падением температуры через слой и конвекцией вне слоя можно пренебречь.

Перегрев, необходимый для возникновения пузыря, рассчитывается по следующей зависимости:

$$\Delta T_{sat} = \frac{2\sigma_{lg}}{R_p (dp/dT)_{sat}}. \quad (10)$$

Понижение температуры в плёнке жидкости находится из выражения:

$$\Delta T_{l,min} = \frac{B \cdot q \cdot R_p^2}{\lambda_l}, \quad (11)$$

где геометрический коэффициент B – это структурный параметр пористого слоя, R_p – средний радиус пор, q – плотность теплового потока, подводимого к нагреваемой поверхности.

С помощью нижеприведённого выражения можно определить минимальный перегрев нагреваемой поверхности, необходимый для начала парообразования для заданного диаметра пор и плотности теплового потока:

$$\Delta T_{sl,min} = 3 \left(\frac{\sigma_{lg}}{R_p (dp/dT)_{sat}} \right)^{2/3} \left(\frac{B \cdot q}{\lambda_l} \right) \quad (12)$$

Максимальное значение коэффициента теплоотдачи для заданного значения плотности теплового потока определяется из выражения:

$$q_{max} = \frac{q}{\Delta T_{sl,min}} = \frac{1}{3B^{1/3}} \left[\frac{\lambda_l (dp/dT)_{sat}^2}{\sigma_{lg}^2} \right]^{1/3} \cdot q^{2/3}. \quad (13)$$

Вторая модель основана на концепции двух термических сопротивлений, однако, влияние свойств пористой среды на испарение жидкостной плёнки учитывается более точно, чем в первой. Перегрев поверхности нагрева, необходимый для начала кипения, выражается следующим образом:

$$\Delta T_{sl} = T_s - T_{sat} = (T_s - T_{lg}) + (T_{lg} - T_{sat}), \quad (14)$$

где T_{lg} – температура жидкостной плёнки на межфазной поверхности.

Плотность теплового потока описывается выражением:

$$q = \frac{F_l}{F} \left(\frac{\lambda_l}{\delta_l} \right) (T_s - T_{lg}), \quad (15)$$

где F_l – поверхность жидкостного микрослоя, F – нагреваемая поверхность и δ_l – толщина микрослоя. Конвективная составляющая в жидкости пренебрежительно мала. Также предполагается, что температура пористого покрытия равна температуре нагреваемой поверхности. Для вычисления F_l/F были сделаны следующие допущения:

1. Пористое покрытие состоит из частиц одного диаметра.
2. Капиллярные каналы внутри пористого слоя имеют одинаковые размеры и связаны друг с другом.
3. Размер пор определяется, как диаметр наибольшей сферы, которая может располагаться между частицами.
4. Каждая пора – активный центр зарождения пузырьков.

Объём пористого покрытия определяется как $V = F \cdot \delta$. После подстановки в уравнение (15) получим:

$$T_s - T_{lg} = \left(\frac{q}{\lambda_l} \right) \left(\frac{\delta_l \cdot V}{\delta \cdot F_l} \right) \quad (16)$$

Разность температур между твёрдой частью и температурой насыщения определяется из уравнения:

$$T_s - T_{sat} = \frac{q}{\lambda_l} \frac{\delta_l \cdot V}{\delta \cdot F_l} + \frac{2\sigma_{lg}}{R_p (dp/dT)_{sat}}, \quad (17)$$

где выражение $\delta_l V / \delta F_l$ может быть определено, если известна форма структуры частиц. Авторы предложили общее выражение для геометрического коэффициента B , которое подходило бы для всех типов геометрий пористого покрытия:

$$B = \frac{\delta_l \cdot V}{\delta \cdot F_l \cdot R_p^2} \quad (18)$$

Выражение для разности температур между элементами пористой структуры и температурой насыщения с учётом геометрического коэффициента принимает вид:

$$T_s - T_{sat} = \frac{B \cdot q \cdot R_p^2}{\lambda_l} - \frac{2\sigma_{lg}}{R_p (dp/dT)_{sat}} \quad (19)$$

Заключение. В работе выполнен детальный обзор существующих подходов к моделированию процессов переноса в микроканалах и микропористых средах. Ввиду перспективности применения микросистем для терморегулирования электроники, внимание многих исследователей направлено на изучение потоков жидкости и теплообмена в микроканалах и микропористых средах. Данные, содержащиеся в литературе, до сих пор не дают однозначных корреляций или информации об оптимальной конструкции микроканалов. Ввиду отсутствия опытных подтверждений нарушения неразрывности потока для микроканалов, анализ, основанный на уравнении Навье – Стокса и законе сохранения энергии, можно считать адекватным при правильном учёте граничных условий. Расхождения между результатами различных исследований объясняются используемыми зависимостями для нахождения теплофизических свойств и спецификой определения граничных условий.

В континуальном приближении возможности интенсификации теплообмена в микроструктурных элементах определяются соотношением безразмерных комплексов, учитывающих физико-химические характеристики материала микроструктуры, теплофизические свойства рабочих тел и гидродинамические особенности потоков.

Литература

1. Kosoy B.V., Numerical Simulation of Two-Phase Flows in Micro-Systems, International Review of Chemical Engineering (I.R.E.C.H.E.), Vol. 2(2), 310-318(2010).
2. Samalam V.K., Convective heat transfer in microchannels, Journal of Electronic Materials 18(1989)611-617.
3. Iwai H. and Suzuki K., Effect of velocity slop and temperature jump conditions on backward-facing step flow in microchannel, Joint Thermal Engineering Conference (1999) 1-8.
4. Toh K.C., Chen X.Y., Chai J.C., Numerical computation of fluid flow and heat transfer in microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002) 5133-5141.
5. J. Li a, G.P. Peterson, P. Cheng, Three-dimensional analysis of heat transfer in a micro-heat sink with single phase flow, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 4215-4231.
6. Zhao, X.F. and Peterson, G.P., Effect of thermofluid and geometrical parameters on convection of liquids through rectangular microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(4), 755-758.
7. Wu H., Weilin Qu, Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46 (2003) 2519-2525.
8. Kohl, Ryu., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, S.M., and Sadowski, D.L., An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, Vol. 48, 1518-1533.
9. J. Li, G.P. Peterson, 3-Dimensional numerical optimization of silicon-based high performance parallel microchannel heat sink with liquid flow, International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 2895-2904
10. Lior, H., Ewoldt, R., and Olsen, M.G., Turbulent and transitional velocity measurements in a rectangular microchannel using microscopic particle image velocimetry, Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, Vol. 29, 435-446.
11. Judy Cheng, YalMaynes D. and Webb B.W., Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45 (2002) 3477-3489.
12. P. S. Lee, S. V. Garimella, D. Liu, Investigation of heat transfer in rectangular microchannels International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005), 1688-1704.

13. Weilin Qu, Issam Mudawar, Analysis of three-dimensional heat transfer in micro-channel heat sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 3973–3985.
14. K. Kawano, K. Minakami, H. Iwasaki, M. Ishizuka, Micro channel heat exchanger for cooling electrical equipment, *Application of Heat Transfer in Equipment* (1998) 173–180.
15. Andrei G. Fedorov, Raymond Viskanta, Three-dimensional conjugate heat transfer in the microchannel heat sink for electronic packaging, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000) 399–415.
16. Косой Б.В. Научно-технические основы интенсификации теплообмена в микроструктурных элементах систем терморегулирования. – Рукопись. Диссертация на соискание учёной степени докт.техн. наук. – ОНАИТ, Одесса, 2015.
17. Ferrell J.K., Alleavitch J., Vaporization heat transfer in capillary wick structures, *Chemical Engineering Progress Symposium* 66 (1970) 82–91.
18. R.A. Moss and A.J. Kelly, Neutron radiographic study of limiting planar heat pipe performance, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 13 (1970) 491–502.
19. Nishikawa K., Ito T., Tanaka K., Enhanced heat transfer by nucleate boiling on a sintered metal layer, *Heat Transfer – Japanese Research* 8 (1979) 65–81.
20. Nakayama W., Daikoku T., Kuwahara H., Nakajima T., Dynamic model of enhanced boiling heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 102 (1980) 445–456.
21. Webb R.L., Haider I., An analytical model for nucleate boiling on enhanced surfaces, *Pool and External Boiling* (1992) 345–360.
22. Zhang H., Zhang Y., Hysteresis characteristic of boiling heat transfer from powder – Porous surface, *Advanced In Phase Change Heat Transfer* (1988) 98–103.
23. M. A. Hanlon, H. B. Ma, Evaporation Heat Transfer in Sintered Porous Media, *Journal of Heat Transfer* 125 (2003) 644–652.
24. Czikk A. M., O'Neill P. S., Correlation of Nucleate Boiling from Porous Metal Films, *Advances in Enhanced Heat Transfer* (1979) 53–60.

ЗМІСТ

НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ. МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ

ТЕХНОЛОГИИ НАПРАВЛЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ В АПК	
Бурдо О.Г.	4
ПИНЧ-ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ШИРОКОЙ ФРАКЦИИ ЛЕГКИХ УГЛЕ- ВОДОРОДОВ И ПРОПАН-ПРОПИЛЕНОВОЙ ФРАКЦИИ НА УСТАНОВКАХ ГАЗОФРАКЦИОНИРОВАНИЯ И КОМПРИМИРОВАНИЯ	
Ульєв Л.М., Маатоук А., Васильєв М.А.	10
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СТВОРЕННЯ РЕТУРУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ КОМПОЗИТІВ	
Корнієнко Я.М., Степанюк А.Р.	16
ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГЕНЕРАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ РУЛОНОВАНИХ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ	
Корнієнко Я.М., Гулієнко С.В., Лялька М.О.	19
ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОБСТЕЖЕННЯ СИСТЕМ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ УСТАНОВ- КИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАФТИ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ПІНЧ-АНАЛІЗУ	
Ульєв Л.М., Кержакова М.О.	22
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОФЕПРОДУКТОВ	
Терзиев С.Г.	26
РАЗМЕРНОСТИ: ГЕНЕЗИС ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ	
Герєга А.Н.	33
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ БЛОКА ЛЬДА	
Бурдо О.Г., Тришин Ф.А., Герєга А.Н.	44
МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ СОРБЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИРОДНИХ СОРЕБЕНТІВ	
Петрушка І.М., Мальований М.С., Ягчишин Ю.Й., Петрушка К.І.	48
НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ОБЛАСТИ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД	
Радченко Н.Л.	52
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПШЕНИЦЫ В СУШИЛКЕ НА БАЗЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТЕРМОСИФОНА	
Бєзбєх І.В., Воскрєсенська Е.В.	57
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ ТА РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ТРИФАЗНОГО СЕПАРАТОРА	
Ляпощенко О.О., Павленко І.В., Усик Р.Ю., Дем'яненко М.М.	62
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТРУМИННОГО ГОМОГЕНІЗАТОРУ МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ	
Самойчук К.О., Ковальов О.О.	67
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМА КАПИЛЛЯРНОГО ТОРМОЖЕНИЯ	
Зыков А.В., Смирнов Г.Ф.	73
МАСООБМІНУ ПРИ КУЛЬТИВУВАННІ МІКРОВОДОРОСТЕЙ	
Дячок В.В., Запорожець Ю.В., Левко О.Б.	79
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СТВОРЕННЯ КОМПЛЕКСНИХ МІНЕРАЛЬНО-ОРГАНІЧНИХ ДОБРИВ З ВИКОРИСТАННЯМ КІСТКОВОГО БОРОШНА	
Степанюк А.Р., Марушевський С.О.	84
ЕНЕРГЕТИКА КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА	
Бєрник І.М.	87
ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ	
Бошкова И.Л., Волгушева Н.В.	90
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНОГО СУШІННЯ СОНЯШНИКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ	
Бандура В.М., Зозуляк І. А., Зозуляк О.В.	94

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ХЛЕБОПЕКАРНОГО, КОНДИТЕРСКОГО И МАКАРОННОГО ТЕСТА	
Янаков В.П.....	100
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕМБРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	
В ПРОЦЕССЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ БЕЛКОВО-УГЛЕВОДНОГО МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ	
Дейниченко Г.В., Мазняк З.А., Гузенко В.В.....	106
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЗМІВ ДІВЕ НА ЗМІНУ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ	
ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ, МОЛОКА ТА ПРИ ВІДНОВЛЕННІ СУХИХ МОЛОЧНИХ	
ПРОДУКТІВ	
Коник А.В.....	110
ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВЫПАРНОГО АППАРАТА НА БАЗЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТЕРМОСИФОНА	
Безбах И.В., Омар Саид Ахмед.....	113
ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В МИКРОСТРУКТУРАХ	
Косой Б.В.....	116

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

ПИНЧ-ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ВЫДЕЛЕНИЯ БЕНЗОЛ-ТОЛУОЛ-КСИЛОЛЬНОЙ ФРАКЦИИ И ГИДРОДЕАЛКИЛАТА В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕНЗОЛА	
Ульев Л.М., Ильченко М.В.....	126
РОЗЧИНЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ У ТРИФАЗНІЙ СИСТЕМІ, УТВОРЕНІЙ ВАКУУМУВАННЯМ	
Гумницький Я.М., Симак Д.М., Нагурський О.А.....	130
КІНЕТИКА АДСОРБЦІЇ АЛЬБУМІНУ ПРИРОДНИМ ЦЕОЛІТОМ	
Гумницький Я.М., Гивлюд А.М., Сабадаш В.В.....	133
ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ	
АЗОТНО-КАЛЬЦІЄВО-ГУМІНОВИХ ДОБРІВ	
Корнієнко Я.М., Сачок Р.В.....	137
МЕТОД РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННОЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ	
З ПАРКОМ РЕЗЕРВУАРІВ	
Ткаченко С.Й., Дишлюк С.В., Пішеніна Н.В.....	142
ЕКСТРАКЦІЯ ДАНИХ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КАРБАМІДУ	
Ульєв Л.М., Яценко О.О., Шпилька В.М.....	147
ГІДРОДИНАМІКА СТАЦІОНАРНОГО ШАРУ ЗАЛІЗНОГО КУПОРОСУ	
Цюра Н.Я., Атаманюк В.М.....	153
ВНУТРІШНЬОДИФУЗІЙНЕ МАСОПЕРЕНЕСЕННЯ ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШННЯ	
ШЛАКУ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	
Барна І. Р., Атаманюк В. М., Матківська І.Р.....	160
КІНЕТИКА ПРОЦЕСУ СТВОРЕННЯ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНО-ГУМІНОВИХ ДОБРІВ	
Корнієнко Я.М., Сачок Р. В., Гайдай С. С., Мартинюк О. В.,	
Куріньовський О. В., Любека А.М.....	167
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ КАВІТАЦІЇ В СОПЛІ ВЕНТУРІ	
Анісімов В. В., Єрмаков П. П.....	171
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА НИЗКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ ГИПОХЛОРИТА НАТРИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ И ВЕТЕРИНАРИИ	
Гиренко Д.В., Демянчук Е.А.....	174
ВПЛИВ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ГІДРОДИНАМІЧНИХ КОЛИВАНЬ НА ВЛАСТИВОСТІ ВОДНО-ЕТАНОЛЬНИХ СУМІШЕЙ	
Дубовкіна І.О.....	180
ПЕРЕВАГИ ЗАСТОСУВАННЯ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ГУМІНОВИХ ДОБРІВ В	
ПРИСУТНОСТІ КІСТКОВОГО БОРОШНА	
Степанюк А.Р., Марушевський С.О.....	183
ПРОЦЕС СТВОРЕННЯ РЕТУРУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ГУМІНОВИХ	
ДОБРІВ В ПРИСУТНОСТІ ОРГАНІЧНИХ І МІНЕРАЛЬНИХ ДОМШОК	
Попович А.Г., Степанюк А.Р.....	186

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СТВОРЕННЯ РЕТУРНУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ГУМІНОВИХ ДОБРІВ В ПРИСУТНОСТІ ОРГАНІЧНИХ І МІНЕРАЛЬНИХ ДОМШОК	
Попович А.Г., Степанюк А.Р.....	188
ГРАНУЛИРОВАНИЕ В ВИХРЕВОМ ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ: АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ГРАНУЛЯТОРОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ	
Москаленко К.В., Ведмедера В.С., Артюхов А.Е., Покотыло В.Н.....	191
КІНЕТИКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ПОДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВИНИ	
Мосюк М. І., Псюк Ю. Я., Рудей І. А.....	194