

Электродинамические технологии – эффективное решение проблем пищевой индустрии

* О. Г. Бурдо^a, Ф. А. Тришин^a, С. Г. Терзиев^c, А. В. Гаврилов^b, И. В. Сиротюк^a

^aОдесская национальная академия пищевых технологий,
г. Одесса, 65039, Украина, *e-mail: poem.onaft@gmail.com

^bАкадемия биоресурсов и природопользования «КФУ им. В.И. Вернадского»,
г. Симферополь, 295000, Крым

^cПАО «ENNI FOODS», г. Одесса, 65005, Украина

Поступила 01.08.2019

После доработки 19.08.2019

Принята к публикации 21.08.2019

Представлены результаты исследований, проведенных в рамках научного направления, которое предложено авторами и названо технологиями направленного энергетического действия. Инструментом реализации таких технологий являются электродинамические генераторы, которые способны осуществлять адресную доставку энергии к нужным точкам объема сырья, в том числе и наномасштабного размера. Показано, что согласованием структуры пищевого сырья и параметров электродинамического воздействия на продукт можно эффективно решать проблемы пищевой индустрии. Приведены классификация электродинамических аппаратов и область их использования в производстве. Дано сравнение традиционных и электродинамических технологий переработки сырья. Установлено, что электродинамические экстракторы интенсифицируют процесс массопереноса в 10–100 раз и дают продукт качественней, чем традиционные. Электродинамические выпарные аппараты удаляют влагу практически до твердой фазы, а сушилки – в разы сокращают время процесса и затраты энергии. Электродинамические аппараты перспективны на химических, фармацевтических, биотехнологических и других производствах.

Ключевые слова: электродинамические аппараты, пищевые энерготехнологии, моделирование, выпарка, сушка, экстрагирование

УДК 664.086.4-047.58:66.047

DOI: 10.5281/zenodo.3970438

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозная модель развития человечества [1] определяет три глобальных кризиса. Первый к 2030 г. – энергетический. Второй к 2060 г. – экологический. Третий к 2090 г. – дефицита пищи. Серьезный вклад в формирование и развитие этих кризисов вносит пищевая индустрия. Во всех экономически развитых странах производство продуктов питания является энергоемким. Выбросы и отходы пищевых производств являются загрязнителями атмосферы, гидросферы и литосферы. Поэтому пищевая индустрия способствует обострению всех кризисов. При этом пищевые технологии отстают в практическом внедрении инновационных технологий от других отраслей экономики [2–4]. Вместе с тем проблемами пищевых энерготехнологий в мире комплексно не занимаются.

Пищевое сырье – это созданные природой сложные биологические структуры, которые при переработке необходимо разрушить с минимальными затратами энергии и при максимальном сохранении пищевой ценности. Использование инновационных технологий в пищевой промышленности позволит создать принципиально новые продукты, не имеющие совре-

менных аналогов. Создание таких технологий должно основываться на комплексном анализе энергетических, теплофизических и биотехнологических явлений. Основными процессами пищевых технологий, которые следует интенсифицировать, являются процессы тепломассопереноса. Именно они определяют как энергетику, так и качество готового продукта.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современный этап развития человечества связан с динамичным ростом потребления энергетических ресурсов при стабильном снижении их запасов. В этих условиях растет роль эффективного расхода энергии, повышения энергетического КПД современных технологий. Одним из лидеров по использованию энергетических ресурсов являются пищевые технологии (ПТ), при которых подавляющее большинство производств осуществляют термическую обработку сырья [5]. При этом эффективность использования и сырьевых, и энергетических ресурсов остается крайне низкой [6–7]. Если сопоставить количество энергии, которое человек получает с пищей, и затраты энергии на ее производство, то общий энергетический КПД не превысит 10% [8].

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.

Для пищевых технологий характерны серьезные научно-технические противоречия. Известно, что повышение уровня температур интенсифицирует процессы теплопереноса, но при этом снижается пищевая ценность продукта, разрушаются функциональные компоненты сырья [9–10]. Традиционные технологии не дают ответа, как устранить эти противоречия. Попытки радикально решить эту проблему на основе тепловых насосов [11], вакуумных технологий [12], использования ультразвуковых интенсификаторов [13–14] не дают результатов. Достоинства низкотемпературных разделительных аппаратов (криоконцентраторов) [15–16] ограничиваются конечными концентрациями до 50°brix.

Серьезной проблемой ПТ являются экология производства и безопасность продукта. В отходах производства часто содержится значительное количество целевых компонентов, коммерческая ценность которых превышает стоимость готового продукта. Однако традиционные технологии не способны их извлекать, поскольку находятся они внутри клеток (оболочки которых от 7 до 30 нм), в капиллярах сырья (размер которых от 5 нм).

Для того чтобы отходы ПТ стали полноценными источниками и резервами пищи, необходимо искать эффективные, инновационные принципы организации основных процессов ПТ. Поэтому процессы биотехнологий, стерилизации, экстрагирования, сушки, сокоотдачи и пр. можно организовывать на основе технологий адресной доставки энергии (ТАДЭ). Принципы, которые могут быть реализованы при переводе пищевых производств на технологии ТАДЭ, позволят существенно снизить энергоемкость, уровень термического воздействия на сырье и продукт и получить принципиально новые продукты.

В настоящее время в мире активно занимаются поиском принципиально новых средств для обработки пищевого сырья. В первую очередь, к таким средствам можно отнести электрические и электромагнитные интенсификаторы. Наиболее мощными и эффективными средствами являются микроволновые (МВ) генераторы [17–19].

Инновационные технологии применения электромагнитного поля при выпаривании

успешно исследуются в мире и демонстрируют хорошие результаты. Так, в Мунзурском университете в Турции был сконструирован микроволновой вакуум-выпарной аппарат, на котором провели эксперименты по выпариванию яблочного сока до концентрации 66,5°brix при температуре до 82°С и при вакууме 50 кПа [20]. В Индийском технологическом институте в Харагпуре проводились опыты по концентрированию ананасового сока до концентрации 50°brix при температуре до 90°С [21]. В Газиантипском университете в Турции проводился эксперимент по выпариванию черничного сока до концентрации 65°brix [22]. Используются микроволновые технологии и при сушке. Так, в Китае в Сычуаньском сельскохозяйственном университете была реализована сушильная установка с микроволновым подводом энергии, с помощью которой исследовали сушку яблочных чипсов при температуре 60°С [23]. Ученые Исследовательского института в Ла-Плате в Аргентине проводили эксперименты по сушке овощей в условиях электромагнитного поля, в результате которых были получены образцы сушеного картофеля при температуре до 103°С при атмосферном давлении и сушеной моркови при температуре до 30°С в вакууме до 3 кПа [24]. Известны случаи применения МВ поля при экстрагировании. В Газиантипском университете в Турции проводили исследования по экстрагированию фенолов из плодов черники в порошкообразном состоянии 60% водным раствором этанола [25]. В результате был получен 87% экстракт.

Недостатками вышеуказанных работ являются ограниченные значения конечных концентраций при выпарке, высокие температуры обработки продукта, высокие энергетические и экономические затраты. В данной статье поставлены задачи решения этих проблем. Научная идея работы – в реализации эффекта адресной доставки энергии к отдельным элементам сырья [26] при его взаимодействии с электромагнитным полем.

Цель настоящей работы – исследование механизмов и моделирование кинетики теплопереноса в электродинамических аппаратах и технологиях комплексной переработки пищевого сырья.

Выдвигается гипотеза, что использование современных средств адресной доставки энергии на основе электродинамических систем позволит организовать эффективный подвод энергии к отдельным элементам пищевого сырья, инициировать мощные движущие силы для регулируемого переноса необходимых компонентов сырья. Именно такие технологии позволят

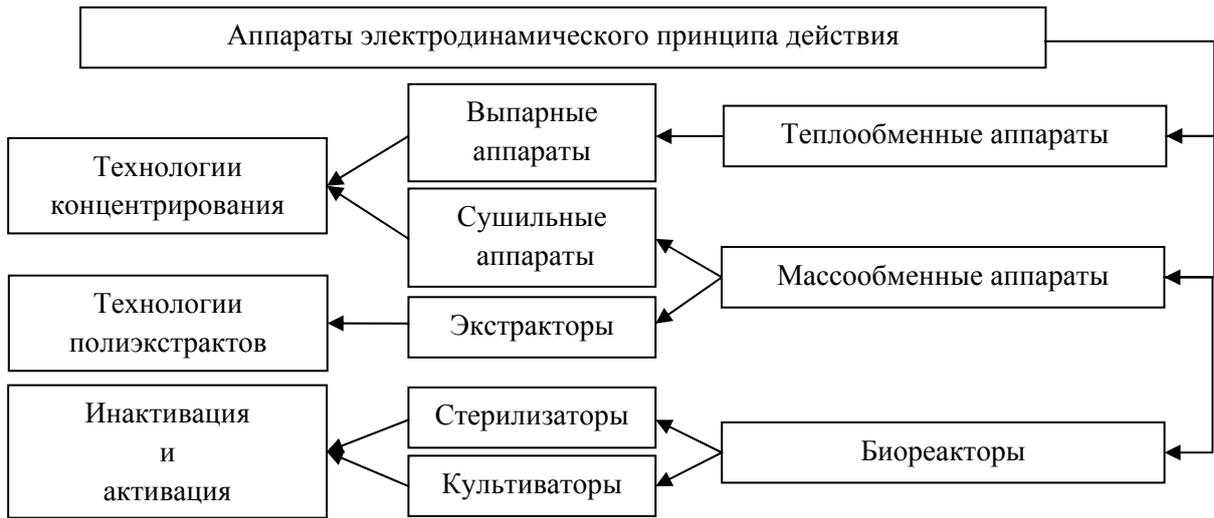


Рис. 1. Классификация электродинамических аппаратов.

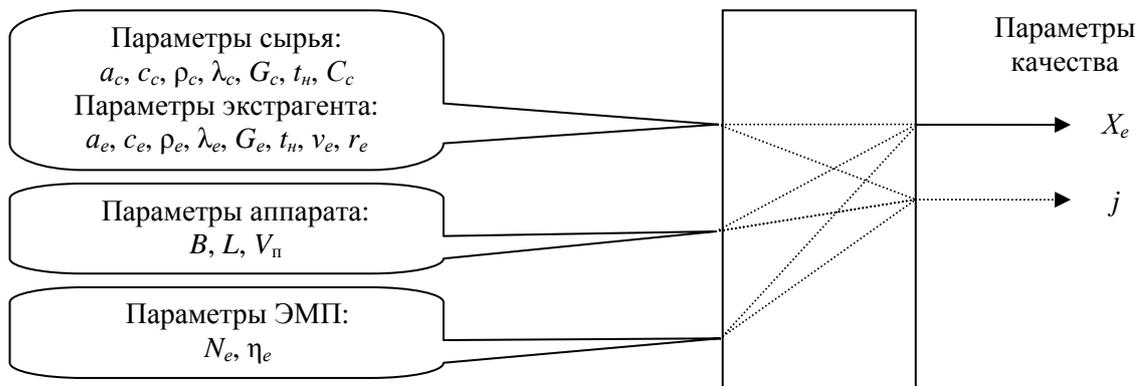


Рис. 2. Параметрическая модель.

эффективно организовать и управлять потоками в процессах обезвоживания и экстрагирования. Электродинамические технологии при комбинировании средств интенсификации процессов внутреннего и внешнего массопереноса в условиях импульсно-циклического характера процессов открывают новые перспективы развития пищевой промышленности.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Накопленный опыт исследований аппаратов с электромагнитным подводом энергии позволяет предложить их классификацию (рис. 1).

В рассматриваемых аппаратах электромагнитные генераторы являются не только источниками энергии, но и эффективным средством управления процессами тепло-массообмена.

Особенности взаимодействия электромагнитного поля с полярными молекулами установлены достаточно давно [27]. Известно, что в условиях сверхвысокочастотного поля происходят интенсивные колебания полярных молекул. Это приводит к диссипации энергии поля в теплоту, нагреву облучаемой системы. Вместе с тем можно управлять этим процессом

и организовать специфичные явления [8]. Так, показана возможность формирования в капиллярной структуре сырья бародиффузионных потоков [28]. Например, параметрическая модель процессов экстрагирования учитывает специфику сырья, аппарата и электромагнитного поля (ЭМП) (рис. 2).

В соответствии с моделью (рис. 2) рассматривается физическая схема (рис. 3) системы «влажное сырье-электромагнитное поле».

Схематично сырье представлено сухой частью (радиопроницаемой) и жидкостью с полярными молекулами (рис. 3). Сырье находится в электродинамическом аппарате при давлении P_0 . При включении сверхвысокочастотного поля электромагнитная волна проникает через радиопрозрачную сухую часть и достигает жидкости. В условиях электромагнитного поля происходит диссипация электромагнитной энергии, мощность которой N , в теплоту с КПД η . При этом тепловой поток складывается из нагрева жидкости $(\eta N)_h$ или (Q_1) до температуры парообразования t_v , теплоты фазового перехода $(\eta N)_v$ или (Q_2) и потерь в окружающую среду $(\eta N)_s$ или (Q_3) .

$$\begin{aligned} \eta \times N &= (\eta \times N)_h + (\eta \times N)_v + \\ &+ (\eta \times N)_s = Q_1 + Q_2 + Q_3. \end{aligned} \quad (1)$$

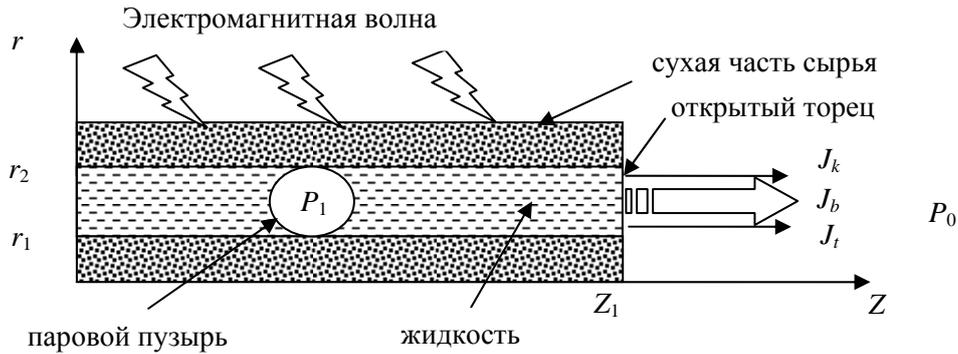


Рис. 3. Физическая схема обработки сырья электромагнитным полем.

Энергетический баланс (1) формируется в слое жидкости, где нагревается влага (G_U) и переводится в пар часть (γ) жидкости (G_U), от которой происходят нагрев сухой части (G_C), теплообмен с окружающей средой и поглощение проникающего электромагнитного излучения (N):

$$G_C \times c_{p_c} \times (\Delta t_{c_i}) + G_U \times c_{p_u} \times (\Delta t_{u_i}) + r \times \gamma \times G_U + Q_3 - \eta \times N = 0. \quad (2)$$

Жидкость в сырье может находиться в прослойке либо в капилляре (рис. 3). Выполним анализ основных процессов, которые происходят в объеме жидкости капилляра при $r_1 < r \leq r_2$.

Первый этап (нагрев жидкости от начальной температуры $t_u = t_n$ до температуры начала парообразования $t_u = t_v$). Выход и образование паровой фазы отсутствует. На феноменологической основе с использованием первого закона термодинамики и уравнения энергии, которые отражают тепловое взаимодействие между жидкостью, сухой частью и электромагнитным полем, установлено нестационарное поле температур с учетом действия ЭМП.

Для длины $0 \leq Z \leq Z_1$; радиусов $r_1 \leq r \leq r_2$.

Начальные условия ($\tau = 0$): $t_u = t_n$; $V_u = V_n$. Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье-Кирхгофа в цилиндрической системе координат (при $\lambda = \text{const}$) и при $\tau > 0$ имеет вид:

$$\frac{\partial t_u}{\partial \tau} = a_u \left(\frac{\partial^2 t_u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial t_u}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_u}{\partial z^2} \right) + \frac{N \times \eta}{V_u \times c_u \times \rho_u}. \quad (3)$$

Влияние ЭМП выражается в (3) как действие внутреннего источника энергии мощностью N и с КПД η .

Используя граничные условия (ГУ) 3 рода и аналогичное (3) нестационарное поле температур в сухой части, можно отразить нагрев этой части от жидкой фазы.

На втором этапе происходит образование паровой фазы. Для формирования парового пузыря необходимы условия, когда температура

в точке максимальна. А это может произойти в глубине капилляра, где стоки теплоты минимальны. Процесс характеризуется постоянством температуры фазового перехода ($t_v = \text{const}$), а подведенная энергия ($N\eta\tau$) расходуется на повышение внутренней энергии при изменении теплоемкости, перевод жидкости в пар. В результате – повышение давления в капилляре. Причем этот рост давления может носить взрывной характер из-за малого объема жидкости в капилляре и достаточной концентрации энергии.

Уравнение на границе поверхности парового пузыря с жидкостью:

$$\frac{\partial V_b}{\partial \tau} \times \rho_v \times r = (N \times \eta)_v. \quad (4)$$

При этом существенные изменения произойдут в формировании поля концентраций целевых компонентов в системе. В соответствии с уравнением Фика нестационарное поле концентраций имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \times \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial C}{\partial z} \times w_z. \quad (5)$$

В работе формулируется следующая гипотеза: использование электромагнитных источников объемного подвода энергии к системе, которая содержит полярные молекулы, позволит сформировать мощный гидродинамический поток парожидкостной фазы из глубины сырья, что сможет существенно снизить внутреннее диффузионное сопротивление и в разы интенсифицировать процесс массопереноса. Эта гипотеза полагает, что поля концентраций в соотношении (5) будут в основном определяться последним слагаемым. Задача электродинамических технологий – согласовать характеристики сырья, параметры электромагнитного генератора и задачи технологического регламента.

Выполненный анализ справедлив и для процессов экстрагирования, и для процессов сушки. Для процессов выпаривания в ЭМП такой анализ выполнен в [29].

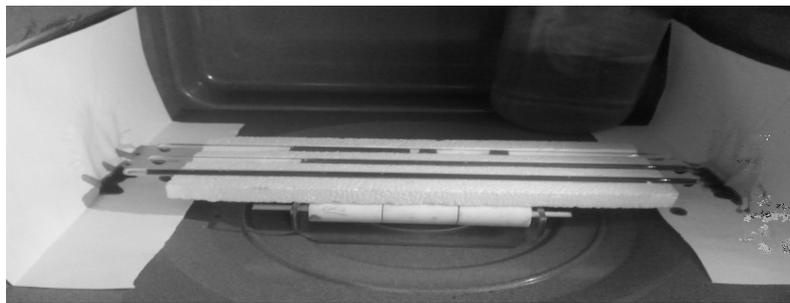


Рис. 4. Модель сырья в МВ камере.

Таблица 1. Результаты визуальных исследований

№	Стенд	Время, с	Температура, °С	Характеристика процесса
1	Термостат	7200	90	Из торцов капилляров испарилось до 1% воды. Выхода чернил нет. Видны четкие мениски.
2	МВ камера	16	66	Выброс окрашенной жидкости из капилляра 1. Зарождение пузырьков пара в капиллярах 2 и 3.
		36	66	Капилляр 1 опустел.
		56	66	Выбросы окрашенной жидкости из капилляров 2 и 3.
		74	66	Все капилляры практически опустели.

Массовый баланс выражает поток влаги и пара из жидкой прослойки и складывается из конвективного (J_K), термодиффузионного (J_T) и бародиффузионного (J_B) потоков при соответствующих коэффициентах массоотдачи ($\beta_K, \beta_T, \beta_B$), поверхностях фазового контакта (F_i, F_{Ki}, F_{Bi}) и разности парциальных давлений ($\Delta P_P, \Delta P_T, \Delta P_B$):

$$J = J_K + J_T + J_B = \beta_K \times F_i \times (\Delta P_P) + \beta_T \times F_{Ki} \times (\Delta P_T) + \beta_B \times F_{Bi} \times (\Delta P_B). \quad (6)$$

В соотношениях (1)–(5): c – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности; r – теплота фазового перехода; N – мощность электромагнитного генератора; η – КПД магнетрона; τ – время работы; z, r – координаты. Индексы: B – бародиффузионный; b – паровой пузырь; v – кипение; u – жидкость.

Доказательство гипотезы выполнено экспериментально. Поставлена задача визуально зафиксировать ожидаемый эффект. Опыты проводились на модели сырья (рис. 4). Модель соответствовала схеме, приведенной на рис. 3.

Капилляр заполнялся водой, подкрашенной чернилами. В оболочке содержались три капилляра. Оболочка с капиллярами помещалась в термостат и в камеру с микроволновым генератором (рис. 4). Подробно схема стенда и результаты видеосъемки процесса бародиффузии представлены в [28].

В настоящее время авторы провели более глубокий анализ результатов видеосъемки (табл. 1).

Анализ результатов (табл. 1) позволяет сделать ряд выводов.

1. Факт существования специфического гидродинамического потока из капиллярных каналов доказан видеосъемкой.

2. Центры парообразования формируются в глубине капилляров, что подтверждает сформулированную гипотезу. В первую очередь формируются центры парообразования в капиллярах, которые ближе к генератору энергии.

3. Процессом формирования бародиффузионного потока и его мощностью можно управлять. Факторами управления являются мощность и направление электромагнитного излучения при их согласовании со структурой сырья, диаметрами капилляров.

Вместе с тем видеосъемка свидетельствует об отличии характера потока от классической бародиффузии. Высокая концентрация электромагнитной энергии практически в точке объема капилляра приводит к фазовому переходу, стремительному росту объема паровой фазы, мгновенному изменению гидродинамической ситуации в капилляре. В результате – взрывной выброс содержимого капилляра. А если объектом рассматривается клетка, то наблюдается разрыв ее оболочки и выброс содержимого клетки.

Авторы назвали этот эффект механо-диффузией. Он объединяет в себе классический диффузионный и специфический чисто гидродинамический потоки. Первое слагаемое в (5) характеризует диффузионный перенос, процесс традиционно вялый. Предложенная концепция опирается на потенциальные возможности второго слагаемого в (5). Это изменения поля

Таблица 2. Традиционное экстрагирование

Механизмы	Конвективная диффузия в стесненных условиях капилляра.
Достоинство	Простота конструкции для аппаратов периодического действия.
Противоречия	Повышение температуры экстрагирования приводит к росту интенсивности процесса, но снижает сохранность витаминов и термолабильных функциональных комплексов.
Проблемы	Для сохранения качества термолабильного пищевого сырья ограничиваются уровнем температуры, при этом продолжительность процесса измеряется многими часами, сутками (фармацевтические производства), годами (коньячные технологии). Извлекаются только растворимые компоненты. Содержимое микрокапилляров традиционные технологии не извлекают.
Перспективы	Решение проблемы отсутствует.

Таблица 3. Электродинамическая технология экстрагирования

Механизмы	Объемный подвод энергии непосредственно к молекулам растворителя. Осуществляется при ГУ 2 рода. Используются электромагнитные генераторы микроволнового диапазона.
Достоинства	Комбинированное действие диффузионных и гидродинамических движущих сил обеспечивает извлечение полиэкстрактов, существенно снижает продолжительность процесса, увеличивает выход целевых компонентов.
Ограничения	Наличие в сырье или экстрагенте полярных молекул.

концентраций за счет выхода концентрированного раствора из капилляра со скоростью w , величина которой зависит от значения скачка давления ΔP в капилляре под действием ЭМП. Связь между этими параметрами вытекает из уравнения гидравлики, дополненного силами поверхностного натяжения, капиллярной системы с длиной каналов (l), их диаметром (d). Учитывается коэффициент поверхностного натяжения (σ), коэффициент трения (λ) и сумма местных гидравлических сопротивлений (ζ):

$$\Delta P = \frac{\rho \times w^2}{2} \times \left[\frac{\lambda \times l}{d} + \sum \zeta \right] + \rho \times g \times l + \frac{\sigma}{d}. \quad (7)$$

В результате объем жидкости в капилляре уменьшается и его текущее значение определяется уравнением материального баланса:

$$V_1(\tau) = V_H - (V_H + V_J)(\tau). \quad (8)$$

Созданы образцы техники, которые реализуют эффект механодиффузии.

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСТРАКТОРОВ

На первом этапе исследовались микроволновые установки лабораторного типа: камерная, вакуумная и с циркуляционным контуром. Все они принципиально отличались от традиционных экстракторов (табл. 2, 3).

Инновационные электродинамические экстракторы, основанные на технологии адресной доставки энергии, способны решать проблемные вопросы (табл. 3).

На вакуумной установке проводилось экстрагирование из шиповника. Плоды и экстрагент располагались в объеме, который по пару

сообщен с обратным холодильником. Температурный режим в системе обеспечивался холодильной машиной, вакуум-насосом и магнетроном камеры. Надежность герметизации системы, согласованность мощностей магнетрона и холодильной машины обеспечивают возможность проведения эксперимента без постоянной работы вакуум-насоса. Показано, что вакуум является серьезным фактором интенсификации массопереноса. С повышением давления от 15 до 45 кПа концентрация экстракта повышается. Однако одновременно растет и температура экстрагирования. А температура является противоречивым фактором – с ее ростом снижается содержание аскорбиновой кислоты. В опытах температура не превышала 40°C. Важное преимущество электродинамических экстракторов – возможность получения полиэкстрактов.

На установке с циркуляционным контуром исследовались процессы извлечения из кофейного шлама целевых компонентов. Шлам является отходом технологии производства растворимого кофе. Это серьезный загрязнитель окружающей среды. При этом он содержит значительное количество полезных веществ. Во-первых, это масло кофе, аналог дорогого масла какао. Во-вторых, это кофеин. Традиционные технологии не способны полностью извлекать эти компоненты из сырья. В отходах остается 4–5% водорастворимых компонентов (а это до 15% от их общего количества). Ставилась задача разработать электродинамический экстрактор, который за счет эффекта механодиффузии решил бы проблему потерь кофеина и масла кофе.

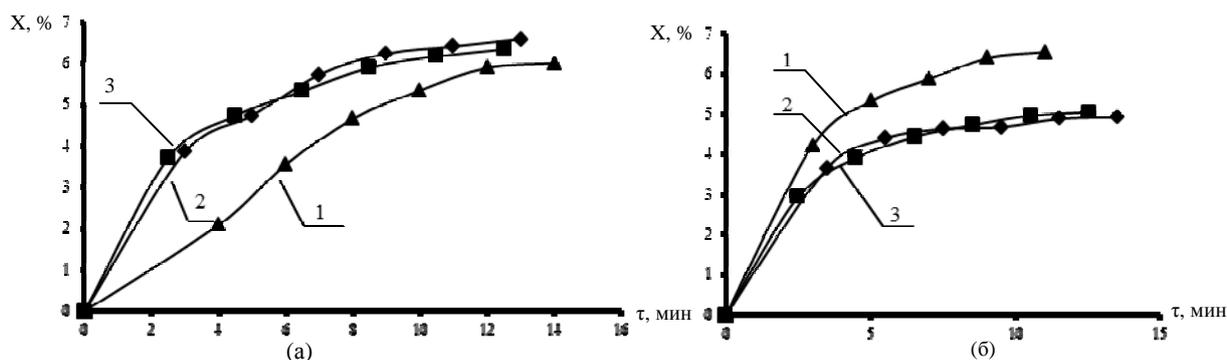


Рис. 5. Влияние вида экстрагента в режиме кипения (1 – спирт; 2 – нефрас; 3 – гексан): (а) термостат, (б) МВ поле.

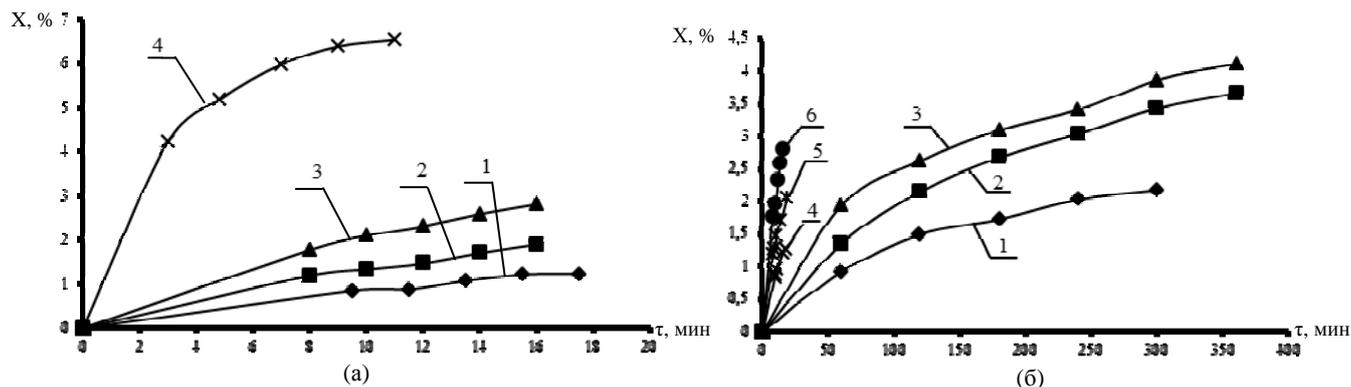


Рис. 6. Кинетика экстрагирования в условиях действия МВ поля в зависимости от температуры этанола (а): 1 – 40°C; 2 – 50°C; 3 – 60°C; 4 – 78,5°C (кипение); влияние характера подвода энергии на экстрагирование спиртом (б): (1–3 термостат, 4–6 в МВ поле), 1 и 4 – 40°C, 2 и 5 – 50°C, 3 и 6 – 60°C.

Важным вопросом при экстрагировании является выбор экстрагента. Традиционные экстрагенты – это гексан, нефрас и т.п. Но они токсичны. Экологически безопасный этанол в традиционных аппаратах имеет худшие массопереносные характеристики.

Проведены исследования влияния вида экстрагента на интенсивность массопереноса (рис. 5).

Удельная мощность составляла 1,3 кВт/кг смеси шлам–экстрагент.

В традиционных технологиях подвода теплоты (рис. 5а) более эффективными в качестве экстрагентов являются гексан и нефрас. Однако наблюдается существенная интенсификация процесса экстрагирования этанолом в микроволновом поле (рис. 5б). Более того, извлечение масла и экстрактивных веществ в микроволновом поле спиртом больше, чем гексаном и нефрасом. Продолжительность процесса в микроволновом поле приблизительно в 20 раз меньше, чем в термостате (рис. 6).

В случае экстрагирования в микроволновом поле температура связана с количеством подведенной микроволновой энергии. Концентрацию экстракта контролировали каждые 2 минуты, начиная с выхода на заданный температурный режим. Проверено влияние природы экстрагента и условий подвода энергии (рис. 6).

Сравнение результатов позволяет сделать три вывода. Первый вывод тривиальный – в микроволновом поле с увеличением температуры повышается скорость извлечения веществ, а в условиях кипения растворителя скорость процесса и количество извлеченных веществ значительно больше, что объясняется турбулизацией приграничного слоя (рис. 6а).

Второй вывод – в микроволновом поле процесс экстрагирования протекает в несколько раз интенсивнее в режимах кипения и практически на порядок выше при температурах ниже, чем температура кипения (рис. 6б). Третий вывод неожиданный и касается неполярного экстрагента – гексана, для которого скорости экстрагирования при кипении и при 60°C достаточно близки. Это можно объяснить тем, что энергия микроволн поглощается в основном влагой, которая содержится в капиллярах шлама, а гексан нагревается уже от шлама. То есть паровая фаза в капиллярах, а соответственно и бародиффузионный поток образуются в сырье уже при низких температурах экстрагента. Кроме того, такие изомеры гексана, как 2,2-диметилбутан, 2,3-диметилбутан и 2-метилпентан кипят при температурах 49,7; 58 и 60,3°C соответственно, что также может вызывать частичную турбулизацию приграничного слоя при температурах ниже температуры кипения.

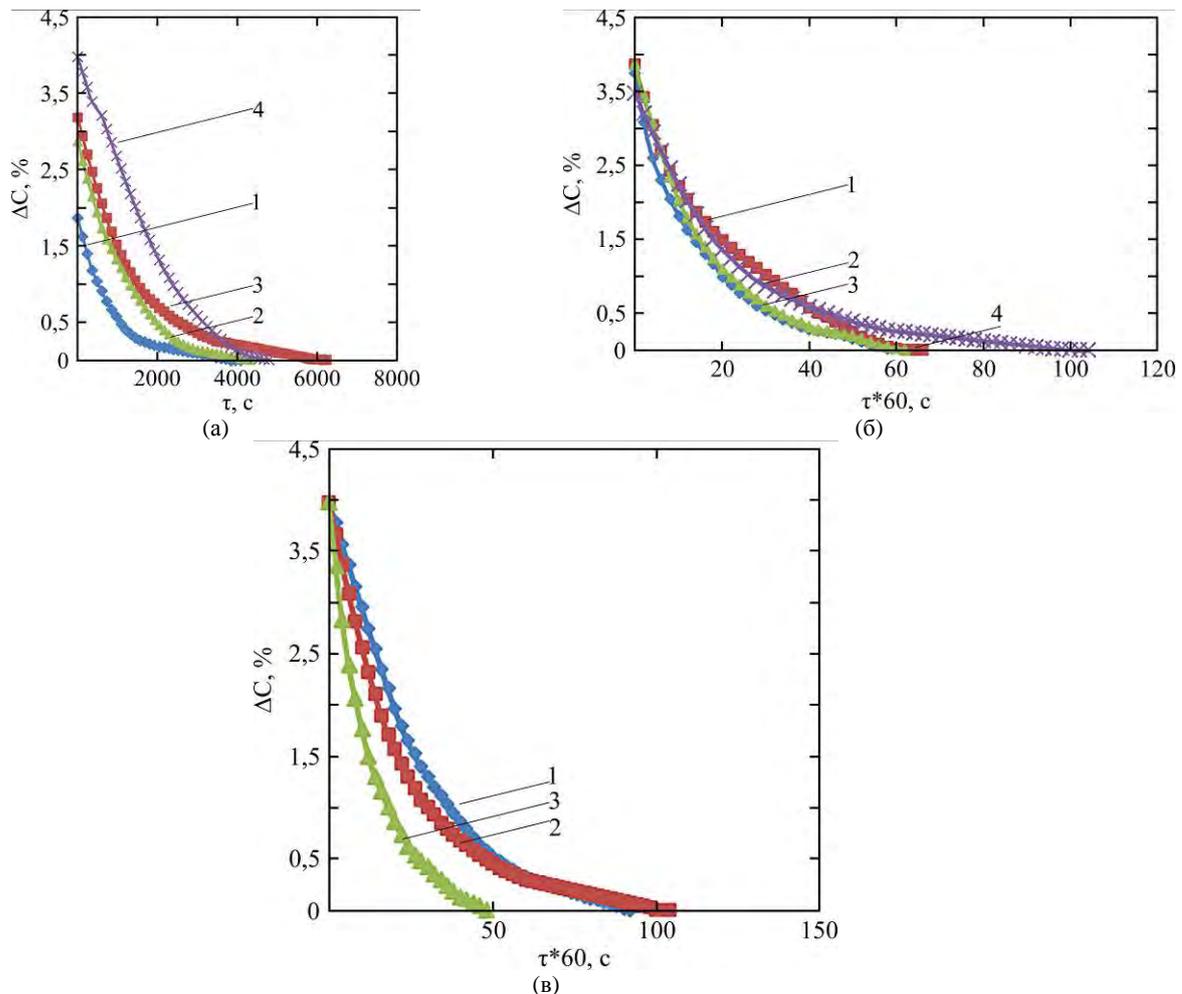


Рис. 7. Кинетика массопереноса при экстрагировании из кофейного шлама в МВ поле.

Обработка массива экспериментальных данных, получение моделей в критериальной форме связано с рядом трудностей. Даже классический расчет только диффузионного потока необходимо проводить, используя коэффициент массопередачи. Этот коэффициент должен учитывать как внешнее, так и внутреннее диффузионные сопротивления. Современная наука массопереноса пока такие задачи не решает. А по соотношению (6) требуется учесть еще и бародиффузионный, гидродинамический поток. Известное уравнение Фика (5) может принять в расчет результат такого потока, если он характеризуется постоянной скоростью. В анализируемом случае поток имеет циклический характер. Его движущая сила (7) строго зависит от структуры каналов, которая для пищевого сырья не организована и постоянно изменяется в связи с эластичностью стенок каналов. Поскольку все эти факторы напрямую зависят от мощности ЭМП, то предложено традиционную модель конвективного массопереноса дополнить безразмерным комплексом, который авторы назвали [8] числом энергетического действия (Bu). Это число характеризует степень интенсификации процесса массопереноса и выражает

отношение мощности инновационной технологии к базовой.

Для задач массопереноса число Bu выражается соотношением мощности ЭМП (N) к базовой мощности (Q_B), которая требуется для перевода в пар жидкой фазы пищевой системы: $Q_B = rV\rho$.

Таким образом, кинетика массопереноса масла из кофейного шлама в условиях действия микроволнового поля выражена зависимостью между числами подобия Шервуда (Sh), Шмидта (Sc), гидромодуля (G) и числа энергетического действия (Bu). В числе Шервуда используется эффективный коэффициент массоотдачи, который относится к макрокинетике и учитывает результат всех потоков из объема сырья (рис. 3). Критериальное уравнение (9) предложено для спирта этилового, а (10) – для гексана:

$$\text{Sh} = 0,014 \times \text{Sc}^{0,33} \times G^{0,15} \times \text{Bu}^{0,71}, \quad (9)$$

$$\text{Sh} = 0,01 \times \text{Sc}^{0,33} \times G^{0,05} \times \text{Bu}^{0,32}. \quad (10)$$

Этанол, в отличие от гексана, способствует переходу в экстракт дополнительно ароматических компонентов, что в ряде технологий оказывается привлекательней.

Для доэкстрагирования кофейного шлама создан экспериментальный образец электродинамического экстрактора. Рациональные технологические режимы его эксплуатации определены на основе комплексных экспериментальных исследований (рис. 7). Установлено, что для обеспечения тонкослойных течений в слое исследуемого продукта, повышения поверхности фазового контакта целесообразно работать в диапазонах расходов $1,4 \cdot 10^{-6} - 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ и при значениях толщины слоя кофейного сырья $1 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Исследовалось влияние основных параметров. Исходное содержание целевых компонентов составляло 4%. Удельная мощность устанавливалась 270, 450, 630, 900 Вт/кг (соответственно линиям 1–4 на рис. 7а). Высота слоя шлама равнялась 8, 14, 20 и 27 мм (соответственно линиям 1–4 на рис. 7б). Объемный расход экстрагента изменялся – $1 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$ и $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ (соответственно линиям 1–3 на рис. 7в).

Установлено, что на процесс массопереноса влияют не только величина энергоподвода и толщина слоя, но и расход экстрагента. При увеличении объемного расхода экстрагента в 3 раза выход экстрактивных веществ из шлама повышается на 35% и сокращается время экстрагирования в 2 раза (рис. 7в). Это является фактором существенного снижения внешнего диффузионного сопротивления. При увеличении скорости потока в 2,5–3,5 раза эффективный коэффициент массоотдачи увеличивается в 2,7–5 раз соответственно.

Для расчета интенсивности массопереноса при экстрагировании из кофейного шлама в условиях действия микроволнового поля рекомендуется следующее соотношение:

$$St_m = 0,004 \times Re^{-0,5} \times Sc^{0,43} \times P^{0,6} \times Bu^{0,33}. \quad (11)$$

Модель (11) установила зависимость массообменного числа Стантона (St_m) от чисел подобия Шмидта (Sc), Рейнольдса (Re), энергетического действия (Bu) и параметрического комплекса (P), который отвечает за структуру слоя. Максимальная относительная погрешность расчета по соотношению (11) составляет 17,6% и наблюдается при малых значениях числа Стантона.

Соотношение (11) являлось ключевым в программе расчета микроволновых экстракторов проточного типа (рис. 8а). Корпус выполнен из каскада резонаторных камер с магнетронами. Дно верхних камер соединяется с поверхностью нижних камер шлюзовыми каналами. Через эти каналы перемещаются с помощью домкрата

блоки кассет с сырьем. Противотоком движется экстрагент (вода). На первом этапе стендовых испытаний методом калориметрии определялись характеристики совместной работы системы МВ излучателей экстрактора, нагрузка каждой кассеты (рис. 8б).

Технические характеристики электродинамического экстрактора приведены в табл. 4.

Кофейный экстракт, полученный в экспериментальном образце аппарата, был исследован в лаборатории предприятия ПАО «ENNI FOODS» и получил положительные оценки по органолептическим, физико-химическим, микробиологическим показателям и показателям безопасности продукта. Электродинамический экстрактор включен в линию доэкстрагирования и позволяет сократить потери целевых компонентов с 4–5 до 0,1–0,2%.

Предлагаемые экстракторы могут использоваться для экстрагирования водой разных видов растительного сырья.

Разработана конструкция микроволнового экстрактора масла, который перерабатывает до 6 кг шлама и обеспечивает 13–20% выхода масла кофе. Время экстрагирования – 30–90 мин.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ВАКУУМ-ВЫПАРНОЙ АППАРАТ

Выпарка – широко распространенная технология пищевых, химических и фармацевтических производств. Однако традиционные выпарные аппараты не отвечают современным требованиям (табл. 5, 6).

Инновационные электродинамические выпарные аппараты, основанные на технологии адресной, точечной обработки элементов сырья, решают проблемные вопросы (табл. 6).

Основными узлами электродинамического выпарного аппарата являются: выпарная камера, конденсатор, водоохладитель, сборник конденсата, вакуум-насос и измерительно-вычислительный комплекс. Подробно конструкция и аналитический анализ электродинамического вакуум-выпарного аппарата рассмотрены в [29]. В данной работе приведены результаты комплексных экспериментальных исследований концентрирования жидких пищевых систем (рис. 9).

В качестве объектов исследования рассмотрены жидкие гомо- и гетерогенные системы. Классификация проводилась по типу растворителя: водо-, спирто- и ацетоно-содержащие. К водосодержащим были отнесены: соки (гранатовый, яблочный, свекольный и эхинацеи), томатная паста, молоко, а также модельные объекты (песок + вода, дуб + вода). В качестве спиртосодержащих исследованы:

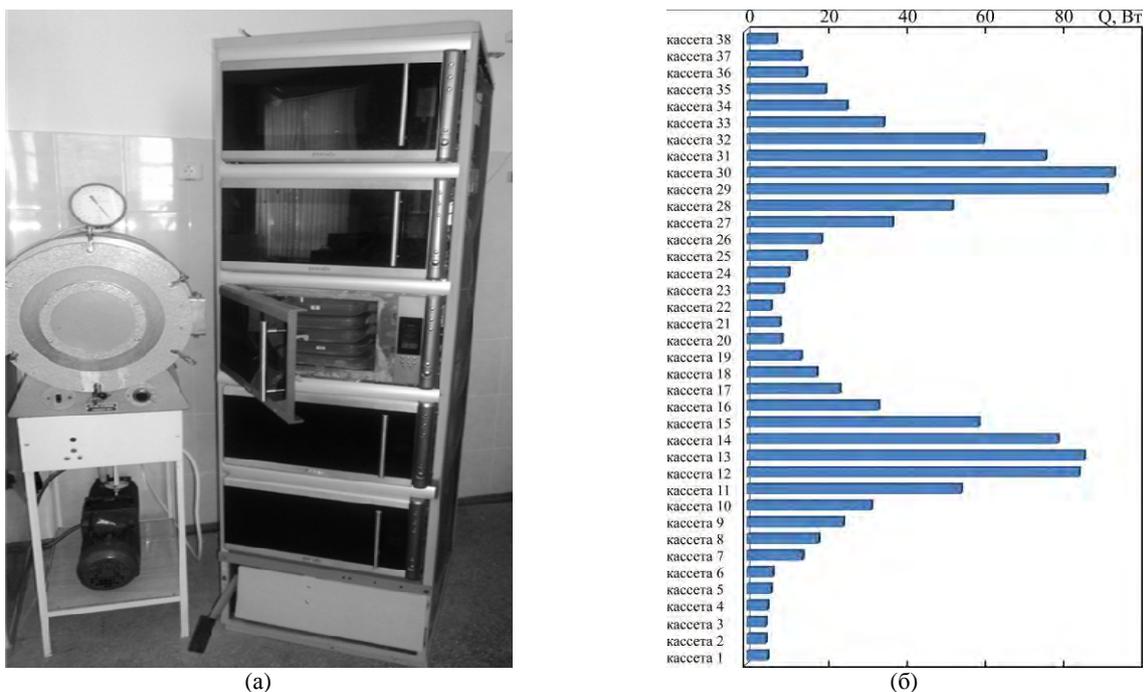


Рис. 8. МВ экстрактор непрерывного действия: (а) общий вид, (б) диаграмма потоков энергии.

Таблица 4. Технические характеристики электродинамического экстрактора

Потребляемая мощность, кВт	$\leq 7,3$ кВт
Рабочий объем, л	180
Магнетроны (0,9 кВт), шт.	5
Габаритные размеры (д/ш/в), м:	0,52/0,68/2,05
Производительность по сырью, кг/ч	≤ 24

Таблица 5. Традиционное выпаривание

Механизмы	Теплопередача при ГУ 3 и 1 рода.
Достоинство	Простота конструкции для аппаратов периодического действия.
Противоречия	Повышение концентрации раствора ведет к росту его вязкости, интенсивность циркуляции снижается, растет термическое сопротивление пограничного слоя и его температура, что недопустимо для пищевых систем.
Проблемы	Невозможно получать качественный продукт высокой концентрации.
Перспективы	На практике ограничиваются концентрацией готового продукта 26–60°brix.

Таблица 6. Электродинамическая технология выпаривания

Механизмы	Объемная обработка сырья при точечном воздействии непосредственно на влагу. Осуществляется при ГУ 2 рода. Используются электромагнитные генераторы микроволнового диапазона.
Достоинства	Обработка сырья при температурах 20–45°C. Возможность получения концентрированных растворов (до 92–95°brix).
Ограничения	Наличие в растворе полярных молекул.

вино (10% спирта), экстракт корня мискантуса (42% раствор спирта), экстракт кофейного масла и кофейный шлам со спиртом. Дополняет линейку объектов исследования ацетоносодержащий экстракт масла виноградных косточек.

Низкие значения температур пара для различных систем (20–45°C) подтверждают безопасность процесса выпаривания в вопросе сохранения пищевой ценности готового продукта. На основе материальных балансов определена степень концентрирования для разных систем (рис. 9).

Характер стремительного роста концентрации раствора на последних этапах выпаривания объясняется тем, что паропроизводительность аппарата остается практически постоянной (рис. 9), а влаги в объеме раствора становится все меньше и меньше. Этот этап выпаривания требует четкой регулировки мощности магнетрона. При одинаковой мощности скорость выпаривания (рис. 10) зависит от типа растворителя.

Результаты опытов показали, что скорость влагоизвлечения в спиртосодержащих системах

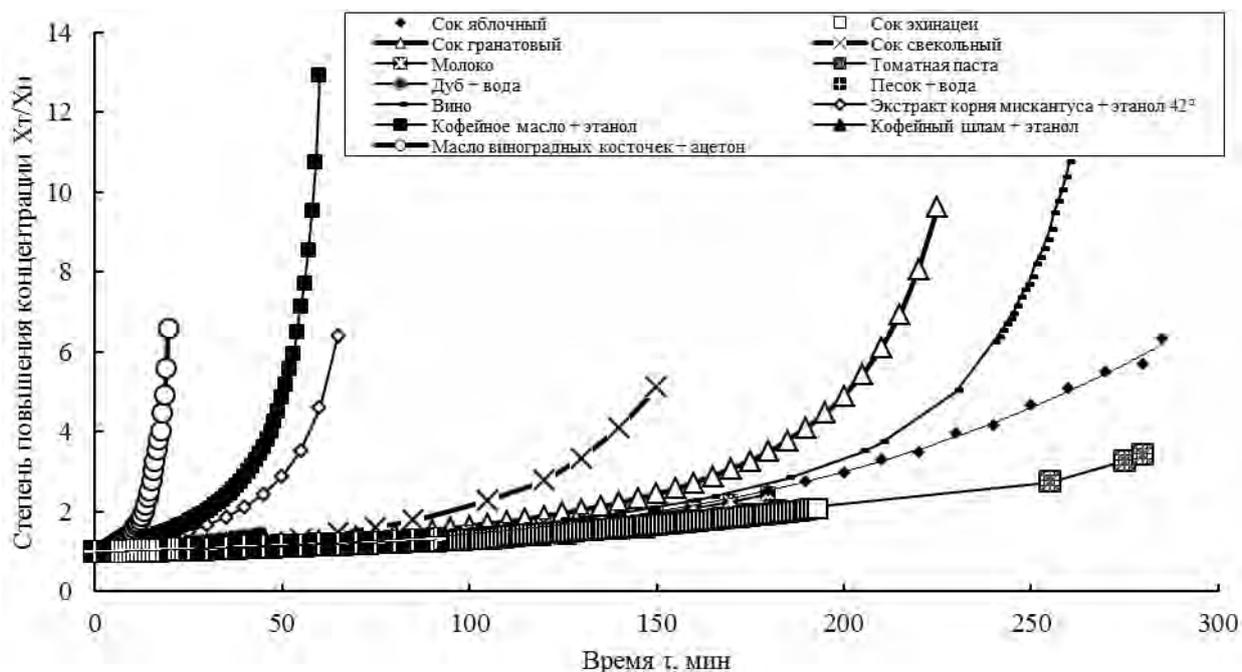


Рис. 9. Кинетика концентрирования в зависимости от типа продукта.

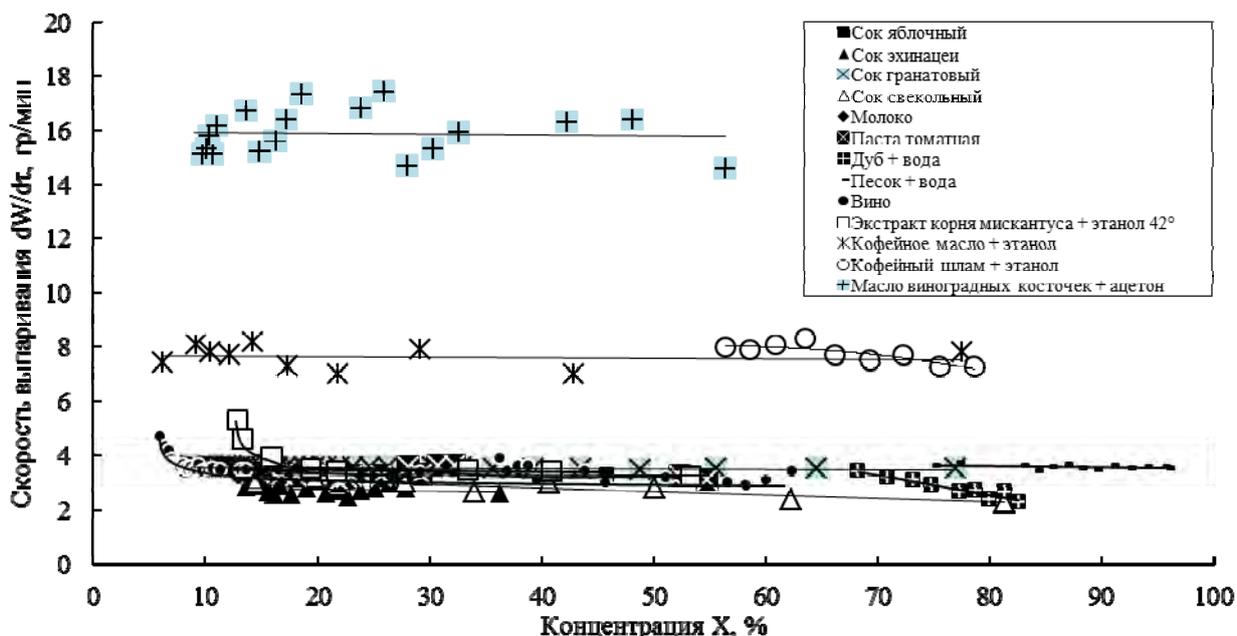


Рис. 10. Зависимость скорости выпаривания от концентрации сухих веществ для различных систем.

в 2–2,5 раза выше, чем в водорастворимых. Ацетонсодержащие растворы отличаются еще большей скоростью, которая в 5 раз превышает скорость влагоизвлечения водорастворимых систем. Давление в системе не превышало 10 кПа, что позволило обеспечить процесс выпаривания при минимальной подводимой мощности электромагнитного поля и соответственно при относительно низкой температуре 40°C. В результате были получены опытные образцы готового продукта, обладающего достаточно высоким качеством в сравнении с результатами классических выпарных аппаратов. Конечная концентрация сухих веществ доходит

до 80–95% вгх , что на 20–25% выше, чем в традиционных установках.

В результате обработки всей базы экспериментальных точек получено критериальное уравнение, которое устанавливает зависимость числа энергетического действия (Vu) от безразмерного давления ($P = P_i/P_0$) и безразмерной теплоты фазового перехода ($R = R_i/R_0$):

$$Vu = 1,73 \times P^{0,07} \times R^{-0,2}. \quad (12)$$

В качестве базовых значений принято $P_0 = 5$ кПа; $R_0 = 525$ кДж/кг.

По результатам стендовых испытаний сделаны выводы.

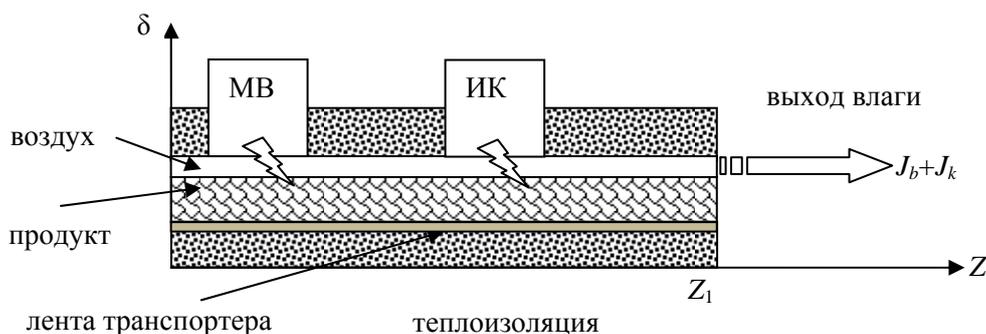


Рис. 11. Физическая схема модуля ленточной сушилки.

1. Показана технологическая целесообразность перехода от классической теплопередачи (ГУ 3 рода) к источникам объемного подвода энергии (ГУ 2 рода), которые не формируют традиционный пограничный слой. Данный инновационный метод позволяет получить качественный готовый продукт с высокой концентрацией сухих веществ.

2. Экспериментально доказана возможность проведения процесса выпаривания в вакууме без постоянной работы вакуум-насоса. Стабильность давления в аппарате поддерживается четким согласованием балансов энергии микроволновых генераторов и системы охлаждения дистиллятора.

3. Определены влияния уровня мощности электромагнитного поля, величины давления, свойств растворителя и типа продукта на паропроизводительность аппарата. Результаты экспериментального моделирования обобщены в критериальной форме. Полученная модель может использоваться в инженерной методике проектирования и оптимизации микроволновых вакуум-выпарных аппаратов периодического действия для широкого класса технологических задач.

4. Разработанная технология выпаривания позволяет получать инновационный продукт высокой концентрации (до 95% бrix) при низкой температуре (до 40°C). Продукт не имеет привкус варки, характерный при выпаривании традиционным методом. Это позволяет значительно увеличить срок годности и качество продукта. Существенно упрощаются задачи логистики. Все это предопределяет коммерческую привлекательность применения инновационного метода выпаривания.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛЕНТОЧНАЯ СУШИЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Традиционной сушильной технике свойственны противоречия. Задача достижения высоких значений коэффициентов массопереноса решается путем увеличения скорости (расхода) сушильного агента. Однако повышение

расхода приводит к пропорциональному росту потерь теплоты в окружающую среду.

Техническая идея предлагаемой установки сформулирована в следующей гипотезе: комбинированное, последовательное воздействие на влажный продукт электромагнитными полями разной частоты позволит инициировать поток влаги из объема сырья за счет действия разных движущих сил: бародиффузионных (обеспечивающих снижение внутреннего диффузионного сопротивления) и конвективных (обеспечивающих удаление влаги с поверхности сырья). Объемный подвод энергии можно осуществлять микроволновыми интенсификаторами, а поверхностный – инфракрасными. В результате сократятся время процесса и величина энергетических затрат. Наибольший практический интерес представляют ленточные сушильные установки, где продукт обрабатывается в тонком слое. Принципиальная схема отдельного модуля ленточной сушилки с микроволновыми (МВ) и инфракрасными (ИК) генераторами приведена на рис. 11.

Продукт движется на ленте со скоростью w . Скорость воздуха относительно продукта составляет v , а зазор канала его движения – δ_v . Энергию излучения поглощает слой продукта, толщина которого $\delta_{пр}$. Поэтому можно считать, что в слое продукта действует объемный источник, мощность которого N , а удельная объемная плотность – q_v . Лента транспортера, толщина которой δ_l , может быть радиопрозрачной либо связанной электрически с корпусом, то есть поглощение энергии излучения в ленте отсутствует. Вместе с тем она взаимодействует при граничных условиях 4 рода с нагретым продуктом. Поверхность продукта взаимодействует при граничных условиях 3 рода с потоком воздуха. Воздух, принимая влагу продукта, увлажняется и нагревается, если его температура ниже, чем температура продукта. Особенностью электромагнитного подвода энергии является то, что максимальные значения и температуры, и влагосодержания наблюдаются внутри продукта. Это отличие от традиционных



Рис. 12. Экспериментальный образец ленточной сушилки.

Таблица 7. Итоговая сводка результатов испытаний модулей сушилки

№	Параметры процесса	Источник энергии	
		ИК поле	МВ поле
1/2/3	Продолжительность τ , с	2400/2100/3300	1200/1200/1200
4/5/6	Температура T , °С	94,6/97,8/93,1	56,5/59,0/62,8
7/8/9	Энергозатраты N , кДж	576/504/792	288/288/288
10/11/12	Скорость удаления влаги dw/dt , г/мин	1,37/1,43/0,92	2,22/2,17/2,14
13/14/15	Процент удаленной влаги ΔW , %	74,37/74,81/76,26	78,10/71,63/72,59
1, 4, 7, 10, 13 – морковь; 2, 5, 8, 11, 14 – яблоко; 3, 6, 9, 12, 15 – лук.			

(конвективных и кондуктивных) способов подвода энергии позволяет существенно снизить затраты энергии на обезвоживание [8]. Уровень энергетических затрат зависит от согласования параметров электромагнитного поля, структуры продукта, скорости его перемещения и параметров воздушной среды. Ключевое влияние имеет схема иницирования потока влаги из продукта при максимальных значениях движущей силы процесса влагопереноса. Экспериментальный образец ленточной сушилки с комбинированными источниками энергии приведен на рис. 12.

Сушилка состоит из ленточного конвейера, трех микроволновых генераторов и трех ИК модулей (по два кварцевых излучателя мощностью 550 Вт каждый). Лента приводится в движение электродвигателем Oriental Motor 6-90, количество оборотов которого плавно регулируется. Проведены испытания отдельных модулей сушилки при их самостоятельной работе.

Опыты осуществлены в широком диапазоне изменения параметров. Установлено, что кинетика процесса сушки разная и существенно определяется видом энергии. В МВ поле продолжительность процесса в разы меньше, чем в ИК поле. При одинаковом значении удельной мощности МВ поле требует в 2 раза меньше времени на процесс сушки и характеризуется в 2 раза большими значениями скорости сушки. Полная сводка ключевых параметров процессов сушки (табл. 7) позволяет установить влияние

источников энергии и вида продукта на кинетические и энергетические характеристики.

По результатам стендовых испытаний сделаны следующие выводы.

1. МВ поле при сушке до 11% требует в 1,5–2 раза меньше затрат энергии на процесс, чем сушка в ИК поле, при этом температуры продукта ниже на 30–40°С.

2. Вид продукта при сушке в МВ поле практически не влияет на продолжительность процесса и скорость удаления влаги.

3. Интенсивность массопереноса при сушке в МВ поле практически в 2 раза выше, чем в ИК поле.

4. Удельная загрузка существенно влияет на скорость сушки. С одной стороны, увеличение толщины слоя на ленте сушилки увеличивает производительность установки, с другой – уменьшается скорость процесса. Уменьшение толщины слоя в 2 раза ведет к увеличению скорости сушки в 2–3 раза.

5. Специальная серия опытов посвящена изучению влияния скорости движения воздуха в камере. Принудительная вентиляция сушильной камеры, с одной стороны, снижает диффузионное сопротивление пограничного слоя. С другой – растут потери тепловой энергии с воздухом, что уменьшает и скорость, и энергоэффективность процесса сушки. Целесообразно значение расхода воздуха в сушилке поддерживать на уровне 0,5 м/с.

6. Увеличение в 4 раза подводимой к продукту мощности уменьшает продолжи-

тельность сушки в 2,5 раза. Однако удельная мощность излучения не должна превышать 10 кВт/м². Эта величина согласуется с рациональным значением загрузки ленты транспортера.

ВЫВОДЫ

Локальное действие на отдельные элементы пищевого сырья – это принципиально новые подходы к организации процессов на пищевых и перерабатывающих производствах. Открывается возможность управления процессами переноса на границе фаз пищевых структур. Инструментом такого управления является энергетическое воздействие. Такое направление названо технологией адресной доставки энергии к элементам сырья. Мощным средством инициирования и управления кинетикой является импульсное электромагнитное поле, в условиях которого осуществляется направленный, локальный подвод энергии к полярным молекулам сырья.

Последние годы характеризуются бурным развитием тепломассообменной техники с электромагнитными источниками энергии. Вместе с тем совершенствование разработок ведется на основе инженерной интуиции. Уровень понимания процессов взаимодействия продукта и электромагнитных волн значительно ниже представлений электрофизических явлений в генераторах электромагнитного излучения. Техника электромагнитных генераторов опередила теорию тепломассопереноса при электромагнитном подводе энергии. Прикладные проблемы, специфика тепломассопереноса в пищевых структурах при электромагнитном подводе энергии практически не изучены. Поэтому успешное аналитическое и экспериментальное моделирование таких процессов может дать мощный импульс широкого внедрения перспективной техники в различные технологии.

Исследования данной работы доказали возможность существенной интенсификации процессов тепломассопереноса на основе электродинамических технологий.

ЛИТЕРАТУРА

- Gabor D., Colombo U., King A.S. *Beyond the age of waste: a report to the Club of Rome*. Elsevier, 2016. 258 p.
- Qiu L.Q., Zhang M., Tang J., Adhikari B. et al. *Food Res Int*. 2019, **116**, 90–102.
- Priyadarshini A., Rajauria G., O'Donnell C.P., Tiwari B.K. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2019, **59**(19), 3082–3101.
- Rawal M., Singh A., Amiji M.M. *Pharm Res*. 2019, **36**(11), 1–20.
- Cai X., Wallington K., Shafiee-Jood M., & Marston L. *Adv Water Resour*. 2018, **111**, 259–273.
- Clapp J., Newell P., Brent Z.W. *J Peasant Stud*. 2018, **45**(1) 80–88.
- Govindan K. *Int J Prod Econ*. 2018, **195**, 419–431.
- Бурдо О.Г. *Эволюция сушильных установок*. Одесса: Полиграф, 2010. 368 с.
- Hosovskyi R., Kindzera D., Atamanyuk V. *Chem Chem Technol*. 2016, **10**(4), 459–464.
- Sabarez Henry T. *Fruit Preservation*. New York: Springer, 2018. P. 181–210.
- Chong C.H., Figiel A., Law C.L., Wojdylo A. *Food Bioprocess Technol*. 2014, **7**(4), 975–989.
- Su Y., Zhang M., Zhang W., Liu C. et al. *Dry Technol*. 2018, **36**(3), 294–306.
- Sabarez, H.T., Keuhbauch S. and Knoerzer K. *21st International Drying Symposium Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València. 2018. P. 1245–1250.
- Rodríguez Ó., Eim V., Rosello C., Femenia A. et al. *J Sci Food Agric*. 2018, **98**(5), 1660–1673.
- Khajehei F., Niakousari M., Eskandari M.H., Sarshar M. *J Food Process Eng*. 2015, **38**(5), 488–498.
- Trishyn F.A., Trach O.R., Orlovskaya Yu.V. *Problemele energeticii regionale*. 2018, (1), 72–86.
- Kumar C., Karim M.A. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2019, **59**(3), 379–394.
- Monteiro R.L., Link J.V., Tribuzi G., Carciofi B.A.M. et al. *J Food Eng*. 2018, **232**, 1–10.
- Rahman M.M., Joardder M.U.H., Khan M.I.H., Pham N.D. et al. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2018, **58**(5), 858–876.
- Bozkir H., Baysal T. *J Food Process Eng*. 2017, **40**(5), 1–9.
- Kumar A., Shrivastava S.L. *J Food Process Eng*. 2019, **42**(3), 1–12.
- Elik A., Yanik D.K., Maskan M., Göğüş F. *J Food Sci Technol*. 2016, **53**(5), 2389–2395.
- Dai J.-W., Xiao H.-W., Zhang L.-H., Chu M.-Y. et al. *J Food Process Eng*. 2019, 1–10. doi:10.1111/jfpe.13212.
- Arballo J.R., Campañone L.A., Mascheroni R.H. *Food Sci Technol Res*. 2018, **24**(5), 811–816.
- Elik A., Yanik D.K., Göğüş F. *Rom Biotech Lett*. 2019, **24**(1), 30–40.
- Burdo O.G., Bandura V.N., & Levtrinskaya Y.O. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2018, **54**(2), 210–218.
- Burdo O.G. *J Eng Phys Thermophys*. 2005, **78**(1), 90–96.
- Burdo O.G., Syrotyuk I.V., Alhury U., Levtrinska J.O. *Problemele energeticii regionale*. 2018, (1), 58–71.
- Burdo O.G., Burdo A.K., Sirotyuk I.V., Pour D.R. *Probleme energeticii regionale*. 2017, (1), 100–109.

Summary

In this paper, the results of studies of a new scientific field, which was proposed by the authors and called the technology of a directed energy action, are presented. The tools for implementing such technologies are electrodynamic generators, which are capable of the energy delivery to the target points in the volume of raw materials, including nanoscale ones. It is shown that by coordinating the structure of food raw materials and the parameters of electro-dynamic effects on the product, it is possible to effectively solve some problems of food industry. The classification of electrodynamic devices and the field of their use in production are given. This paper solves the problem of building the scientific foundation for electrodynamic technologies, which will effectively organize and control the impact on the structures of raw materials, when combining the capabilities of micro and macrokinetics under the conditions of the pulsed-cyclical

nature of the processes. The general physical laws and mechanisms of transfer processes in electrodynamic devices (parametric and math models) are considered. The visual confirmation results of the baro- and mechanodiffusion effects are analyzed. The stand research results of electrodynamic apparatuses (extractor, evaporator, and dryer) are presented. A comparison of traditional and electrodynamic technologies for processing raw materials is given. It is established that electrodynamic extractors intensify the mass transfer process by 10–100 times and give a better product than traditional ones. The electrodynamic evaporators remove moisture almost to the solid phase, and dryers significantly reduce the process time and energy costs.

Keywords: electrodynamic apparatuses, food energy technologies, evaporation, drying, extraction