

## Microwave Energy as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polyextract Formation

Burdo O.G.<sup>1</sup>, Syrotyuk I.V.<sup>1</sup>, Alhury U.<sup>2</sup>, Levtrinska J.O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Odessa National Academy of Food Technologies

Odessa, Ukraine

<sup>2</sup> Aleppo, Syrian Arab Republic

**Abstract.** The prospects of using the specifics of food raw materials structure for organizing mass transfer in the processes of extraction and dehydration has been shown. Authors studied in depth, in comparison with existing studies, selective effect of microwave energy on moisture in food raw materials. It has been shown that targeted energy supply to nanoscale elements in food raw materials is the basis for the creation of innovative technologies. The instrument for controlling such processes can be an electromagnetic field. A successful combination of the structure of food raw materials and field parameters can initiate a powerful flow of target components from product volume. Authors have analyzed driving forces of the effect of "barodiffusion". Mechanisms and stages of the processes of components transfer from plant raw materials were proposed for the gradientless supply of electromagnetic energy. The technique, stand and results of visualization of the effect of "barodiffusion" were presented. Created stand includes an electromagnetic energy generator equipped with a digitized endoscopic camera shielded from the field, which allowed the authors to get a visualization of the phenomenon for the first time. The results of experimental studies of extraction and evaporation processes in the microwave field during the processing of food systems of different structure were considered: alcohol-water-containing, dispersed and homogeneous. Obtained results testify to the prospects of introduction of equipment using the effect of "barodiffusion" in the technology of cognac spirits, oils, polyextracts, essences, food concentrates, phytopreparations.

**Keywords:** microwave assisted extraction, vacuum evaporation, nanotechnology, the effect of "barodiffusion", technology of targeted energy delivery, modeling.

**DOI:** 10.5281/zenodo.1217259

### Energia microundelor ca factor de intensificare a transferului de căldură și de masă și formarea unui polyextract

Burdo O .G.<sup>1</sup>, Sirotiuk I. V., Alhuriy Yu.<sup>2</sup>, Levtrinskaya Yu. O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Academia Națională de Tehnologii Alimentare

Odessa, Ucraina

<sup>2</sup> Alepo, Republica Arabă Siriană

**Rezumat.** Se discută perspectivele utilizării specificului structurii materiilor prime alimentare pentru organizarea transferului de masă în procesele de extracție și deshidratare. Autorii au studiat în profunzime, în comparație cu studiile existente, efectul selectiv al energiei cu microunde asupra umidității în materiile prime alimentare. Se demonstrează că furnizarea de energie orientată către elementele nanometrice ale materiilor prime alimentare reprezintă baza pentru crearea de tehnologii inovatoare. Instrumentul pentru controlul unor astfel de procese poate fi un câmp electromagnetic. Sub acțiunea câmpului asupra umidității în materia primă, datorită dilatării termice, apar zone de presiune crescută în interiorul capilarelor, ceea ce facilitează un transfer intensiv al fluxului componentelor în extractant. În mod similar, procesele de deshidratare sunt intensificate. Efectul studiat se numește barodifuzie. Sunt luate în considerare modelele fizice și matematice ale formării fluxului de umiditate. Autorii analizează forțele motrice ale efectului "barodifuziei". Sunt propuse mecanisme și etape ale proceselor de transfer al componentelor din materii prime vegetale în lipsa gradientului de aducerea energiei. Se prezintă procedeul, standul și rezultatele vizualizării efectului "barodifuziei". Rezultatele studiilor experimentale ale proceselor de extracție și evaporare în câmpul de microunde în timpul procesării sistemelor alimentare de diferite structuri sunt considerate: alcool-apă care conține, dispersat și omogen. Au fost efectuate studii experimentale pentru următoarele produse alimentare: sucuri de fructe și legume, midii, butași de cafea și extracte de cafea, ulei de cafea, cățeluș. Rezultatele obținute atesta perspectivele de introducere ale echipamentelor, folosind efectul barodifuziei în tehnologia spiritelor de cognac, uleiuri, poliextracte, esente, concentrate alimentare, fitopreparatii.

**Cuvinte-cheie:** extracția cu microunde, reziduurile de vid, nanotehnologia, efectul de barodifuzie, livrare a energiei, tehnologiile alimentare, modelarea.

**Микроволновая энергия, как фактор интенсификации тепломассопереноса  
и формирования полиэкстракта**

**Бурдо О.Г.<sup>1</sup>, Сиротюк И.В.<sup>1</sup>, Альхури Ю.<sup>2</sup>, Левтринская Ю.О.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Одесская национальная академия пищевых технологий

Одесса, Украина

<sup>2</sup> Алеппо, Сирийская Арабская республика

**Аннотация.** Обсуждаются перспективы использования особенностей структуры пищевого сырья для организации массопереноса в процессах экстрагирования и обезвоживания. Авторами углубленно, в сравнении с существующими исследованиями, изучено избирательное воздействие микроволновой энергии на влагу в пищевом сырье. Показано, что адресный подвод энергии к наномасштабным элементам пищевого сырья является основой создания инновационных технологий. Инструментом управления такими процессами может быть электромагнитное поле. Удачное сочетание структуры пищевого сырья и параметров поля способно инициировать мощный поток целевых компонентов из объема продукта. При воздействии поля на влагу в сырье благодаря температурному расширению возникают зоны повышенного давления внутри капилляров, что способствует интенсивному переходу потока содержимого в экстрагент. Аналогично интенсифицируются процессы обезвоживания. Исследованный эффект назван «бародиффузия». Рассмотрены физические и математические модели формирования потока влаги. Авторами анализируются движущие силы эффекта «бародиффузии». Предлагаются механизмы и стадии процессов переноса компонентов из растительного сырья при безградиентном подводе электромагнитной энергии. Представлены методика, стенд и результаты визуализации эффекта «бародиффузии». Созданный стенд, включавший электромагнитный генератор энергии, оснащенный экранированной от поля цифровой эндоскопической камерой, позволил авторам впервые получить визуализацию явления. Приведены результаты экспериментальных исследований процессов экстрагирования и выпаривания в микроволновом поле при обработке различных по структуре пищевых систем: спирто – водосодержащих, дисперсных и гомогенных. Экспериментальные исследования проведены для следующих пищевых продуктов: фруктовых и овощных соков, мидий, кофейного шлама и экстрактов кофе, кофейного масла, шиповника. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности внедрения оборудования с использованием эффекта «бародиффузии» в технологии производства коньячных спиртов, масел, полиэкстрактов, эссенций, пищевых концентратов, фитопрепаратов.

**Ключевые слова:** микроволновое экстрагирование, вакуумная выпарка, нанотехнологии, эффект «бародиффузии», технологии адресной доставки энергии, пищевые технологии, моделирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно широко известной модели Римского клуба в ближайшие десятилетия вероятно возникновение энергетического, экологического, а затем – продовольственного кризиса [1]. Такие прогнозы подтолкнули научное сообщество к совершенствованию процессов производства пищевых продуктов с акцентом на более эффективное использование энергии и сырья. Разработка нанотехнологий и новых способов подвода энергии, начатая ещё в начале 80-х годов, дала мощный толчок к развитию новой техники. Ранее тонкие инструменты подвода энергии применялись, преимущественно, в медицине, военных и высоконануальных отраслях, затем при удешевлении технических средств методы получили развитие и в пищевых технологиях. Работы по внедрению методов с применением селективного действия на наноразмерные объекты параллельно ведутся в странах Западной Европы, Соединенных Штатах

Америки, Китае и странах тихоокеанского бассейна, России и т.д. Особое место в таких исследованиях занимают методики с применением микроволнового поля, однако, единого объяснения особенностям его воздействия на органические структуры авторами не дается.

## I. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Усилия многих научных школ направлены на решение проблем обеспечения энергетическими ресурсами. Учеными предлагаются новые методы системного подхода к исследованию энерготехнологических проблем [2-3], инновационные теплотехнологии [4-5], внедрения альтернативных источников энергии, тепловых насосов [6], систем теплоутилизации [7] и пр. Применение предлагаемых подходов в решении задач

эффективного использования энергии особенно актуально для пищевой индустрии.

В процессах производства пищевых продуктов зачастую необходимо взаимодействовать со структурами растительного или животного происхождения, имеющими сложную капиллярную структуру, зачастую – наноразмерную. В процессах экстрагирования, сушки и обезвоживания тонкие капилляры и стенки клеток значительно осложняют диффузионные процессы [8]. С появлением электромагнитных генераторов энергии западными учеными исследуются диффузионные процессы в условиях действия электромагнитного поля [9]. Процессы, возникающие при действии поля, сначала считались случайными, однако дальнейшие исследования подтвердили селективное действие микроволнового поля на молекулы воды [10-11]. Авторами [10] отмечается, что при воздействии микроволнового поля помимо обычной термальной диффузии присоединяется составляющая действия микроволнового поля, существенно интенсифицирующая процесс. Это объясняется дипольным сдвигом полярных молекул воды [11]. Однако, такого объяснения недостаточно для процессов сушки и обезвоживания, которые также значительно интенсифицируются в микроволновом поле [12-18].

В процессах экстрагирования стенки растительных клеток осложняют диффузионные процессы, препятствуют извлечению целевых компонентов [19]. Однако, при использовании микроволнового поля выход экстрактивных веществ значительно возрастает, что отмечено в научных работах западных [20-22], азиатских [23-25] и отечественных ученых [26-27]. Можно сделать вывод, что для разрыва клетки и высвобождения целевых компонентов необходима не только интенсификация движения молекул, а и значительное возрастание давления.

Применение микроволнового экстрагирования в комбинации с ультразвуковым воздействием [28-30] и термическим нагревом [31-33] показывает превалирующее влияние микроволнового поля на интенсификацию процессов.

Для пищевых технологий характерны серьезные научно технические противоречия

между растущими требованиями к качеству и безопасности пищевого продукта, энергоемкости его производства и техникой тепломассопереноса. Повышение интереса к пищевым концентратам и связанная с этим задача обезвоживания сырья, многообразие термического оборудования и низкая эффективность использования энергии, ужесточение регламентаций к экологии производства и безопасности готового продукта – все это сложнейшая системная задача.

Проанализировав современные исследования, можно утверждать, что решение этих противоречий лежит в плоскости поиска новых принципов организации тепломассообменных процессов, использовании уникальных возможностей комбинированных влияний на процессы переноса, формировании сложных комбинаций движущих сил, направленных на эффективное извлечение целевых компонентов из сырья [26]. Энергетика должна стать не только характеристикой, основным результатом, но и инструментом организации технологии, средством управления кинетикой процессов переноса в элементах различных систем. Применение направленного, селективного подвода энергии позволит сохранить термолабильные элементы сырья. Именно благодаря этому эффекту, на наш взгляд, достигается повышение выхода биологически активных компонентов [22], фенольных соединений [24], полисахаридов [29], органических пестицидов [32]. Особое внимание следует уделять микро- и наноразмерным структурам сырья. Эти элементы в представленных работах практически не рассматриваются [34].

Выдвигается гипотеза, что целесообразно искать возможности управления процессами переноса на уровне наномасштабных элементов пищевого сырья с помощью полного использования поверхностных явлений и инновационных методов энергетического воздействия. Создание основ теории таких технологий, доказательство их эффективности, экспериментальная проверка предложенных гипотез определяется как цель настоящих исследований. Все это будет способствовать комплексному решению ключевых проблем человечества энерго- ресурсоэффективного, экологически безопасного производства

продуктов питания на основе перспективных принципов – нанотехнологий.

## II. СТРУКТУРА ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ

Традиционные нанотехнологии предусматривают манипулирование молекулярными элементами и создание систем с новыми физическими и химическими свойствами. Базой таких технологий является сложный лабораторный инструментарий.

В лаборатории «Пищевые нанотехнологии» Одесской национальной

академии пищевых технологий предложено и развивается принципиально новое направление [26], пищевые нанотехнологии (ПНТ). Суть направления в том, что эффективно используется характерная структура пищевого сырья (рис.1).

Проведенный анализ показал, что целью большинства пищевых технологий являются наноразмерные элементы сырья: молекулы воды и оболочки клеток, поры и капилляры, полисахариды и белки. Именно на эти объекты нацелены основные этапы пищевых технологий (рис.1).



Рис. 1. Масштабная шкала объектов пищевых нанотехнологий.

Впервые было предложено организовывать процессы биотехнологий, стерилизации, экстрагирования, сушки, сокоотдачи на наномасштабном уровне. А это соответствует определению нанотехнологий [34]. Принципы, которые могут быть реализованы при переводе пищевых производств на нанотехнологии, позволят существенно снизить энергоемкость, уровень термического воздействия на сырье и продукт, получить принципиально новые продукты. Парадигма и научные основы разрабатываемых в ОНАПТ пищевых нанотехнологий включают: гипотезу бародиффузионного переноса из наномасштабных элементов сырья, термодинамическую схему нанопроцесса и тепломеханическую модель растительной клетки, кинетическую модель массопереноса [26]. С позиций нанонаук объяснены факты изменения и трансформации структуры вкусовых и ароматических комплексов продукта, стерилизация микроорганизмов

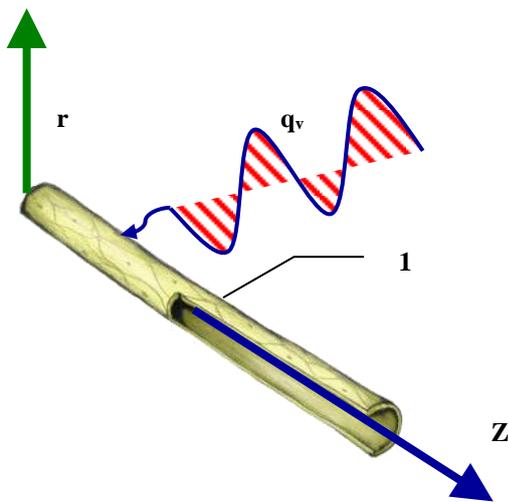
при пониженных температурах и т.п. Показано, что причина этих фактов общая – действие электромагнитного поля (ЭМП) [26]. Вместе с тем, выявлено ряд несоответствий с принятыми положениями, установлено, что в раствор переходит большее количество компонентов, чем может быть растворено. Объяснению этого парадокса посвящена настоящая работа.

## III. МЕХАНИЗМ И МОДЕЛЬ БАРОДИФФУЗИИ

Для объяснения выявленных парадоксов предлагается научно-техническая концепция: «в условиях ЭМП можно организовать адресную доставку энергии к полярным молекулам элементов сырья и обеспечить выход из сырья мощного потока, который содержит хорошо растворимые компоненты твердой фазы (диффузионный поток), и практически не растворимые компоненты твердой фазы, связи которой с

ней слабые». Это сугубо механический поток, мощность которого определяется разностью давлений. Его можно инициировать, им можно управлять параметрами электромагнитного поля. Поскольку указанный поток определяется не только диффузионными, но и механическими движущими силами ему дан термин «бародиффузионный». Использование в процессах экстрагирования, выпарки и сушки современных систем с ЭМП позволит создать аппараты для комплексной, малоотходной технологии переработки пищевого и лекарственного сырья с получением широкого спектра высококачественных биологически активных препаратов медицинского, пищевого и кормового назначения при минимизации энергетических затрат и экологической чистоте производства.

Рассмотрим физическую модель отдельного капилляра (рис.2), который заполнен жидкостью и находится в электромагнитном поле, плотность которого  $q_v$ .



**Рис. 2. Постановка задачи моделирования эффекта бародиффузии из капиллярных структур растительного сырья.**

Ставится задача разработать математическую модель процесса взаимодействия микроволнового электромагнитного поля с жидкостью в капилляре 1 (рис.2). Подвод энергии  $N$  – объемный при ГУ II рода.

В основе моделирования первый закон термодинамики и уравнения Фурье-Кирхгофа, которые отражают тепловые взаимодействия между элементами рассматриваемой системы. Для процессов выпаривания в ЭМП такой анализ выполнен в

[26]. Основываясь на модели, полученной в [26], исследуем процесс экстрагирования из твердой фазы пищевого сырья. Более сложная структура сырья предопределяет и особые, характерные эффекты процесса.

Анализ выполним отдельно для 1 этапа (нагрева продукта от начальной температуры  $t_1 = t_n$  до температуры начала парообразования  $t_1 = t_i$ ) и для 2 этапа (собственно парообразования).

На первом этапе выход пара отсутствует, и энергия расходуется только на повышение температуры продукта.

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

Начальные условия ( $\tau = 0$ ):  $t_1 = t_n$ ;  $V_1 = V_n$ .

Нестационарное поле температур с учетом действия ЭМП определяется в форме

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left( \frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_1 c_{1v} \rho_1}, \quad (1)$$

В соотношении (1):  $c$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности;  $N$  – мощность электромагнитного генератора;  $\eta$  – коэффициент полезного действия (КПД) магнетрона;  $\tau$  – время работы;  $z, r, \varphi$  – координаты.

Влияние ЭМП выражается в (1) как действие внутреннего источника энергии мощностью ( $N$ ) и с КПД ( $\eta$ ).

На втором этапе происходит образование паровой фазы. Процесс характеризуется постоянством температуры фазового перехода ( $t_i = const$ ), а подведенная энергия ( $N\eta\tau$ ) расходуется на повышение внутренней энергии при изменении теплоемкости, перевод воды в пар. В результате – повышение давления в капилляре. Причем, этот рост давления может носить взрывной характер из-за малого объема жидкости в капилляре и концентрации энергии

$$P(\tau) = Pa + \Delta P \quad (2)$$

При этом, существенные изменения произойдут в формировании поля концентраций целевых компонентов в системе. В соответствии с уравнением Фика

нестационарное поле концентраций имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \frac{\partial c}{\partial z} w_z \quad (3)$$

Первое слагаемое в (3) характеризует чисто диффузионный перенос, процесс традиционно вялый. Предложенная концепция опирается на потенциальные возможности второго слагаемого в (3). Это изменение поля концентраций за счет выхода концентрированного раствора из капилляра со скоростью  $w$ , величина которой зависит от значения скачка давления  $\Delta P$  из (2). Связь между этими параметрами выражается из уравнения гидравлики капиллярной системы с длиной каналов (l), их диаметром (d), коэффициента трения ( $\lambda$ ) и суммы местных гидравлических сопротивлений ( $\zeta$ ) при коэффициенте поверхностного натяжения ( $\sigma$ ):

$$\Delta P = \frac{\rho w^2}{2} \left[ \frac{\lambda l}{d} + \Sigma \zeta \right] + \rho g l + \frac{\sigma}{d} \quad (4)$$

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

$$V_1(\tau) = V_n - (V_{\Pi} - V_{\Psi})(\tau) \quad (5)$$

Причем, уменьшение объема может быть следствием выброса объема пара ( $V_{\Pi}$ ) и части жидкости ( $V_{\Psi}$ ) из капилляра.

Таким образом, система соотношений (1) – (5) определяет нестационарное поле температур и концентраций, материальный и энергетический балансы процессов. Проведем анализ состава объема жидкости в соотношении (5).

Структура потока из капилляра (рис.2) представляется эквивалентной электрической схемой (рис.3).

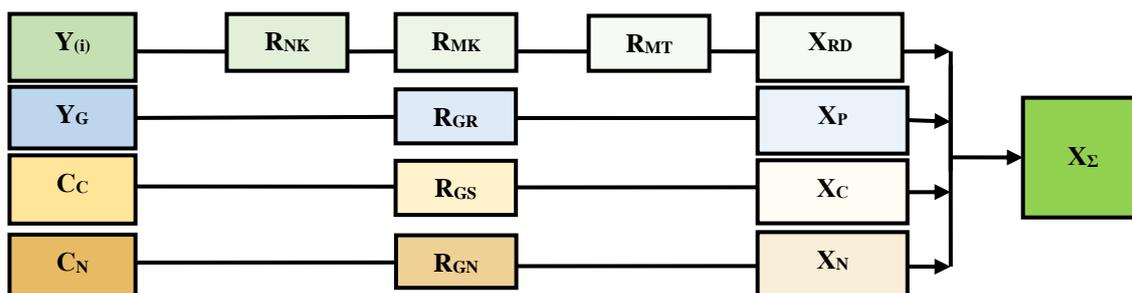


Рис. 3. Эквивалентная электродиффузионная схема сопряженных процессов переноса гидродиффузионными потоками в системе «твёрдая фаза – жидкость – электромагнитное поле».

Здесь  $Y(i)$  и  $Y_G$  – соответственно, текущее в твердой фазе и граничные значения концентрации растворимых компонентов;  $X_{\Sigma}$  – суммарное значение всех перенесенных в экстракт компонентов;  $C_C$  и  $C_N$  – соответственно, концентрации в твердой фазе слаборастворимых и нерастворимых в экстрагенте компонентов;  $X_C$  и  $X_N$  – то же, но в экстракте,  $X_{RD}$  – диффузионная,  $X_P$  – растворимых компонентов в экстракте.

Исходя из классической теплофизической схемы массопереноса [4, 5, 26] механизм

диффузионного переноса из волокнистой структуры в поток соответствует только части схемы (рис.3). Последовательная цепочка диффузионных сопротивлений состоит из суммы сопротивлений нанокapилляров ( $R_{NK}$ ), микрокапилляров ( $R_{MK}$ ) и сопротивления массоотдачи ( $R_{MT}$ ).

Суммарный поток всех компонентов в интегральной форме определится (см.(6)):

$$\Sigma M_i = (M_{P1} + M_{P2} + M_C + M_N) F^{-1} = \frac{Y - X_{RD}}{R_D} + \rho \left[ \frac{P_K - P_0}{R_{GR}} + \frac{P_K - P_0}{R_{GS}} + \frac{P_K - P_0}{R_{GN}} \right] \quad (6)$$

Интенсивность переноса отдельных компонентов определяется балансом соответствующих сил, которые формируются

в капилляре межклеточного пространства. Результирующая этих сил определит скорость потока конкретного компонента.

Нестационарное одномерное поле концентраций растворимых веществ определяется уравнением конвективной диффузии Фика.

А для нерастворимых компонентов чисто диффузионный поток отсутствует. Соответствующие механизмы и модели сведены в табл.1.

Таблица 1.

Механизмы переноса компонентов из капиллярной структуры.

Характеристика потока	Движущая сила	Сопротивление потоку	Масса компонента	Модель процесса
Конвективный диффузионный массоперенос	Разность концентраций $Y - X_{RD}$	Диффузионное сопротивление, $R_D$	$M_{P1}$ (поток j1)	$\frac{dM_{P1}}{Fd\tau} = \frac{Y - X_{RD}}{R_D}$
Механический перенос растворимых веществ из пограничного слоя	Разность давлений $P_K - P_0$	Гидравлическое сопротивление, $R_{GR}$	$M_{P2}$ (поток j1)	$\frac{dM_{P2}}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{GR}}$
Механический перенос слаборастворимых веществ из капилляров	Разность давлений $P_K - P_0$	Гидравлическое сопротивление, $R_{GS}$	$M_C$ (поток j3)	$\frac{dM_C}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{GS}}$
Механический перенос нерастворимых веществ из капилляров	Разность давлений $P_K - P_0$	Гидравлическое сопротивление, $R_{GN}$	$M_N$ (поток j4)	$\frac{dM_H}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{GN}}$

Выделены (табл.2) возможные механизмы процессов переноса в системе «объем клетки

– оболочка – межклеточное пространство – среда».

Таблица 2.

Механизмы и стадии процессов переноса компонентов из растительного сырья при безградиентном подводе электромагнитной энергии.

Элементы сырья	Режим и механизм процесса	Стадии процессов
Межклеточное пространство	Массоперенос при экстрагировании за счет диффузионных механизмов	1) Поступление экстрагента в каналы; 2) Диффузия растворимых веществ в стесненных условиях капилляра; 3) Конвективная диффузия от границы раздела в среду
Межклеточное пространство	Массоперенос растворимых и нерастворимых компонентов из каналов в среду за счет инерционных сил	1) Формирование центра парообразования; 2) Рост давления в канале; 3) Выброс компонентов из каналов в среду
Объем клетки	Комбинированное энергетическое, фильтрационное и диффузионное воздействие на содержимое клетки, механическое воздействие на мембрану клетки	1) Формирование центра парообразования; 2) Рост давления в клетке, и ее объема; 3) Переход компонентов из объема клетки в межклеточное пространство
Оболочка клетки	Деформация оболочки клетки за счет сил внутреннего давления	1) Повышение степени напряженного состояния мембраны клетки; 2) Увеличение диаметров проницаемых каналов мембраны; 3) Разрыв мембраны

Следующим этапом работы было доказательство эффекта бародиффузии. Визуальные исследования этого явления проводились на стенде и на рабочем участке - модели капиллярно-пористого продукта (рис.4).

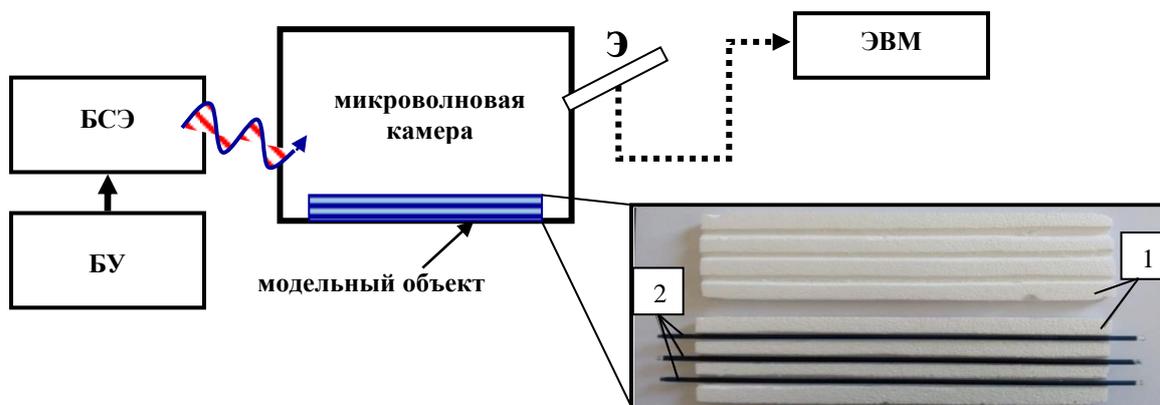


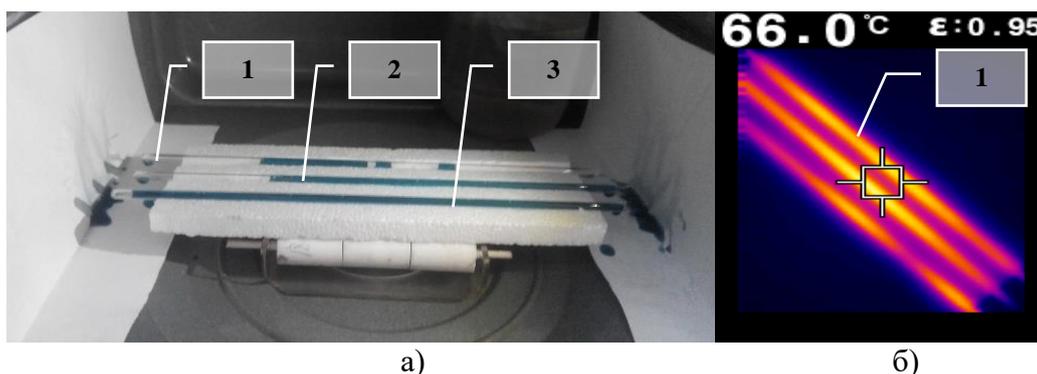
Рис.4. Схема экспериментального стенда и модельного объекта.

Основными узлами стенда (рис.4) были микроволновая камера с блоком силовой электроники (БСЭ) и блоком управления (БУ). Упрощенная модель содержала оболочку (1) и стеклянные капилляры, заполненные подкрашенной жидкостью (2). Оболочка выполнена из радиопрозрачного материала, который имеет низкую теплопроводность (рис. 4).

В камере размещался модельный объект и эндоскопическая цифровая камера (Э) экранированная для работы в микроволновом поле. Модель помещалась в термостат, разогретый до 90 °С, где находилась 2 часа. После извлечения модели тепловизором FLIR

TG167 измерялось поле температур, и фотографировались капилляры.

Температурное поле было однородным, а содержимое капилляров практически не уменьшилось. При обработке модели в электромагнитном поле результаты оказались другими. На фотографии (рис.5.а) заметно, что после 60 с обработки в микроволновом поле содержимое капилляров существенно уменьшилось. Если вместимость капилляра составляла  $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ , то в результате обработки в МВ поле объем жидкости в капиллярах составил:  $1,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ;  $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ;  $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  (рис.5).



а) – фотография модельного объекта; б) – термограмма модельного объекта.  
1 – капилляр №1; 2 – капилляр №2; 3 – капилляр №3.

Рис.5. Результаты обработки модели в микроволновом поле.

Покадровый анализ полученных видео позволил зафиксировать момент «выброса» содержимого капилляра. Наблюдались регулярные выбросы жидкости. Первый был зафиксирован уже на 16 секунде (рис.6).

Зафиксировано, как из капилляра №1 (рис. 6), который ближе всего находился к магнетрону, выбрасывается поток окрашенной жидкости. С интервалом в 20 секунд произошло 2 таких выброса. Видно

интенсивное образование пузырьков во всех капиллярах. Через 50 секунд наблюдались выбросы во всех капиллярах.

Вероятно, что аналогично процесс протекает и в капиллярах пищевого сыря.

Анализ полученных результатов привел к следующим выводам:

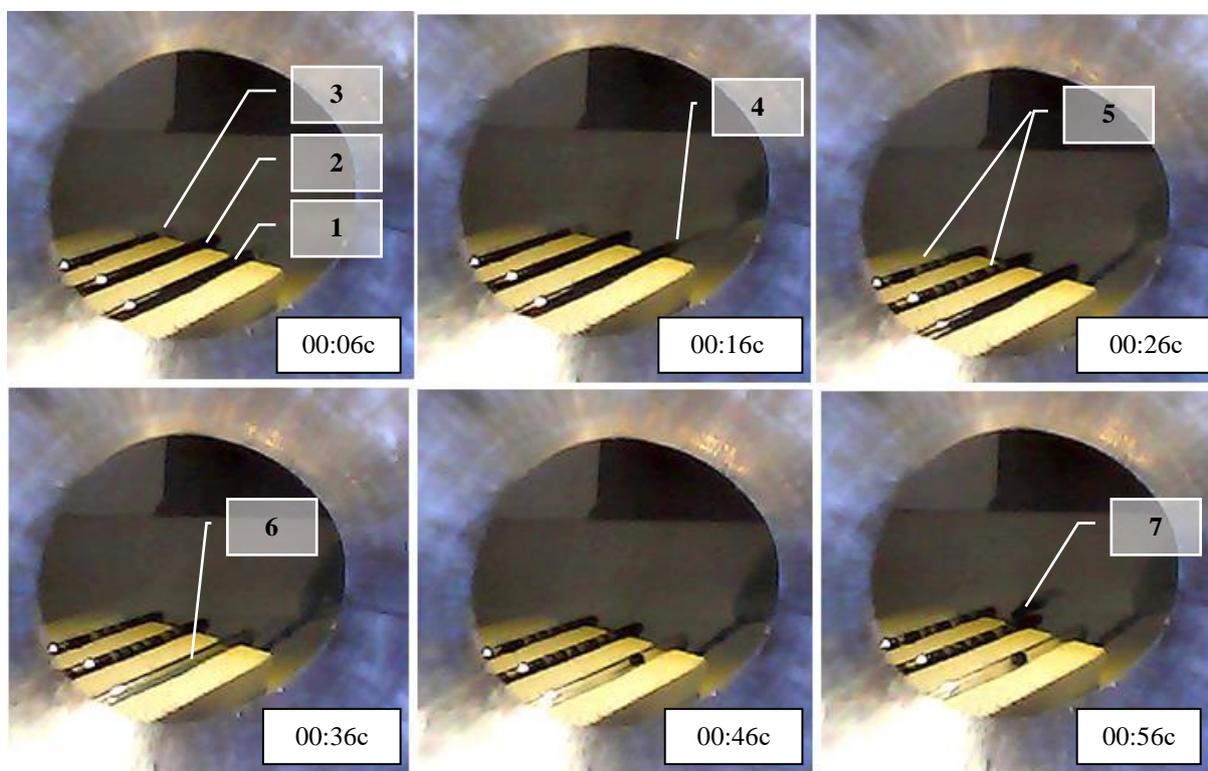
1. Термограммы свидетельствуют, что, нагрев жидкости в капиллярах существенно отличается. Переход цвета, от сиреневого к желто-оранжевому, показывает (рис.5 б), что самые высокие температуры в центрах капилляров. А это, в свою очередь, предпосылки к концентрации энергии, локальному перегреву жидкости в глубине капилляра и к образованию в них паровой фазы.

2. Сопоставление термограммы с фотографией показывает, что большие перегревы достигались в капилляре №1 (рис.5, б), и первые выбросы жидкости наблюдались из этого же капилляра (рис.6).

3. Наблюдалась последовательно выбросы из капилляров №3 и №2. Последним запускался капилляр №1.

4. Таким образом, обработка модели в термостате в течение 2 часов оказалась без результата, а в МВ поле выбросы жидкости фиксировались на 16 секунде.

5. В результате эксперимента капилляры, находившиеся под влиянием МВ поля, практически полностью опустели.



1 – капилляр №1; 2 – капилляр №2; 3 – капилляр №3; 4 – выброс из капилляра №1; 5 – пузырьки пара; 6 – капилляр №1 опустел; 7 – выброс из капилляра №2.

**Рис. 6. Покадровый анализ видео визуализации эффекта бародиффузии.**

Полученные видеокadres убедительно подтверждают эффект бародиффузии.

#### IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАРОДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Экспериментальные исследования проводились на стенде, основными узлами которого являются: вакуумная микроволновая каме-

ра, заполненная продуктом. Перед началом опытов камера вакуумировалась с помощью вакуум-насоса. В процессе эксперимента давление в камере стабилизировалось за счет согласования мощности подведенной электромагнитной энергии и работой системы отвода энергии из камеры. Для этого паровой объем камеры сообщался паропроводом с конденсатором, температурный режим которого регулировался водоохлаждающей си-

стей. В комплект водоохладителя входила холодильная машина, циркуляционный насос и терморегулятор. Образовавшийся конденсат собирался в специальной емкости, которая устанавливалась на прецизионных цифровых весах. Стенд компьютеризирован, текущая информация от электронных весов, измерителя температуры выходящего пара и продукта в выпарной камере через интерфейс поступает, регистрируется и обрабатывается контроллером. В стенде использовались электронные весы типа TBE-0,21-0,01 и датчики температур типа Dallas DS18B20. Информа-

ция собиралась на электронно-вычислительную машину (ЭВМ) SHUWI CW1506.

Разработанная программа предусматривала отображение на экране дисплея термограмм, убыли влаги из камеры и мгновенные значения скорости удаления влаги (% в минуту).

Для исследований воздействия микроволнового поля на пищевое сырье были выбраны продукты с различными свойствами, в том числе и термолабильные (табл. 3).

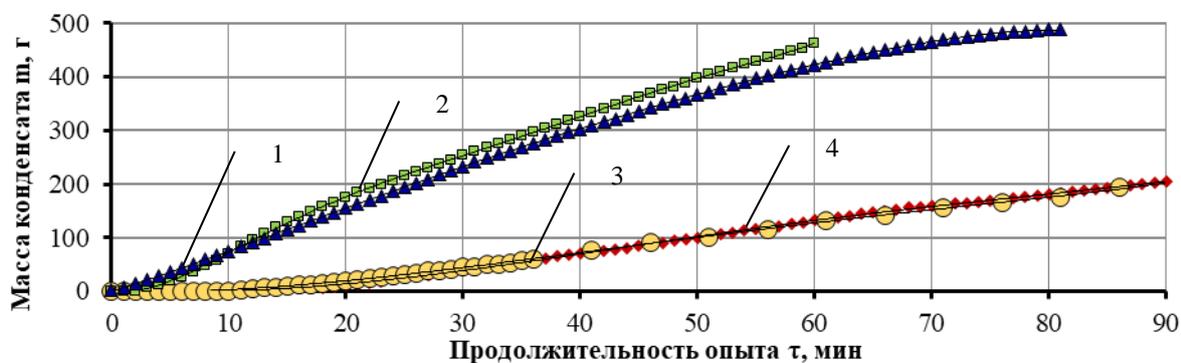
Таблица 3.

Объекты экспериментального исследования.

Продукт	Тип	Структура
Сок эхинацеи	Лекарственное растительное сырье	Жидкая гомогенная система
Экстракт шиповника	Лекарственное растительное сырье	Жидкая гомогенная система
Гранатовый сок	Пищевой продукт	Жидкая гомогенная система
Экстракт кофе	Пищевой продукт	Жидкая гомогенная система
Томатная паста	Пищевой продукт	Жидкая гетерогенная структура
Морепродукты	Мидии	Твердые фракции и вода
Экстракт масла кофе	Спиртовой раствор	Жидкая гетерогенная композиция
Кофейный шлам	Спиртовая система	Дисперсная гетерогенная композиция

В опытах регистрировались: потребляемая мощность, вакуум, температура продукта и паропроизводительность ( $W$ ). Текущие значения  $W$  определялись по показаниям электронных весов (по массе конденсата в сборнике).

Таким образом, с высокой точностью определялся выход пара. Рабочие температуры не превышали 50 °С. Зависимости изменения массы конденсата для 4 продуктов приведены на рис.7.



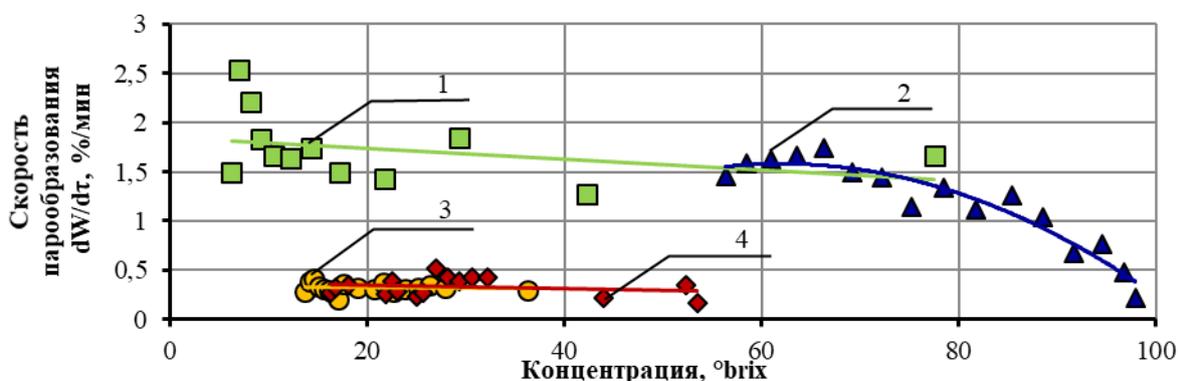
1 – кофейное масло; 2 – кофейный шлам; 3– томатная паста; 4 – сок эхинацеи

Рис. 7. Изменение массы конденсата на выходе из МВА.

Результаты эксперимента позволили определить скорость удаления влаги, изменение которой показано на рисунке 8. Эксперименты проводились при фиксированной мощности микроволнового поля, которая составляла 800 Вт/кг.

При более высокой мощности были проведены эксперименты по концентрированию экстракта шиповника и кофе.

Результаты этих экспериментов представлены в таблице 4.



1 – кофейное масло; 2 – кофейный шлам; 3– томатная паста; 4 – сок эхинацеи

Рис. 8. Линии скорости парообразования в МВА.

Таблица 4.

Скорость парообразования при обезвоживании экстрактов.

Продукт	Удельная мощность, Вт/кг	Скорость влагоизвлечения, г/с	Концентрация, °brix	Температура, °С
Экстракт шиповника	1034	5,4	3,4...60	52,3...59,2
	830	3,2	3,4...49	43,1...45,6
Экстракт кофе	1034	1,27	7,8...43	54,1...60,3
	830	0,94	7,8...32	42,6...45,9

Температура в ходе проведения экспериментов практически не превышала 60 °С, что особенно ценно для процессов обработки растительного сырья, богатого витамином С, каким является экстракт шиповника. Для концентрирования экстракта кофе снижение температуры позволяет значительно, по сравнению с методами распылительной сушки экстракта, улучшить качество конечного кофейного концентрата за счет сохранения ароматических веществ.

**V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В результате анализа рис. 8 следует, что скорости образования паровой фазы в диапазоне концентраций 10 ... 80 °brix стабильны. Они определяются мощностью генератора и видом растворителя. Причем

отличия пропорциональны значениям скрытой теплоты фазовых переходов.

Анализ результатов опытов приводит к следующим выводам:

- скорость образования паровой фазы в МВА практически постоянна (незначительные флуктуации можно объяснить погрешностью эксперимента);
- достигнуты высокие значения концентраций продукта (до 80 °brix);
- кофейный шлам на выходе практически не содержал жидкой фазы;
- влияние объема жидкости в продукте замечается после концентраций более 80 °brix;
- спиртосодержащие системы характеризуются скоростью выпаривания в разы выше, чем водосодержащие.

Все эти результаты подтверждают сформулированную гипотезу о новом явлении «бародиффузии».

Дополнительным доказательством являются факты, которые получены на кафедре ранее (табл.5). Выводы из таблицы 5 можно сделать однозначные: в экстракт переходят вещества, которые не растворяются экстрагентом [35]. Это касается комплексов ароматических компонентов, сквалена. Объяснить эти результаты можно только с помощью эффекта «бародиффузии».

Подтверждением бародиффузионного эффекта являются результаты экстрагирования из растительного лекарственного сырья. В исследованиях применены плоды шиповника, одно из богатейших по содержанию витамина Р плодовых и ягодных растений. В плодах шиповника в 10 раз больше аскорбиновой кислоты, чем в черной смородине, в 50 раз больше, чем в лимоне, и в 100 раз больше, чем в яблоках.

Таблица 5.

Сопоставление экспериментальных фактов с литературными данными.

№	Система	Сведения о параметрах процесса	Факты в условиях электромагнитного поля.
1	«Древесина – водно - спиртовые растворы»	В раствор переходит до 46% древесины	В раствор перешло более 80% древесины
2	«Древесина – водно - спиртовые растворы»		Повышенное содержание ароматических компонентов
4	«Зерна кофе – вода»	В раствор переходит до 30% содержимого зерен	В раствор перешло более 40% содержимого зерен
5	«Зерна кофе – вода»		Повышенное содержание ароматических компонентов
6	«Зерна амаранта - спирт»	Спирт практически не растворяет сквален	В полученном масле амаранта до 4% сквалена

Традиционно при переработке плодов шиповника последовательно используются различные виды экстрагентов. Проведенные опыты на микроволновом вакуумном экстракторе показали, что можно организовать получение полиэкстрактов сразу, с использованием воды в качестве экстрагента. Для этого необходимо инициировать режим «бародиффузии». Образцы полиэкстракта шиповника отличались повышенным содержанием аскорбиновой кислоты.

Все эти примеры свидетельствуют о том, что «бародиффузионные» технологии являются мощным инструментом реализации пищевых наноэнерготехнологий [35]. Они позволят, по сравнению с традиционными технологиями, существенно повысить концентрацию биологически активных веществ и сократить время процесса, создать технологии переработки пищевого сырья, которые полностью отвечают современным требованиям ресурсо- и энергоэффективности, экологической безопасности и требованиям рыночной экономики. Следует ожидать и создание

принципиально новых продуктов, не имеющих аналогов в современной кулинарии. Например, работа микроволнового вакуумного выпарного аппарата показала возможность получения высококачественных продуктов с концентрацией до 90 °brix. А это основа для уникальных кулинарных композиций.

Таким образом, управление процессами переноса на уровне наномасштабных объектов пищевого сырья, является новым и перспективным научным направлением совершенствования традиционных процессов производства, продуктов и их применения.

### ВЫВОДЫ

В работе аналитически и экспериментально доказано существование нового явления, нового эффекта, который назван авторами «бародиффузионный эффект при безградиентном волновом подводе электромагнитной энергии к полярным молекулам». Именно за счет этого эффекта из сырья выходит мощный диффузионный поток экстракта, который дополняется

потоком целого комплекса компонентов, в целом не характерных для классических диффузионных процессов. Локальное действие на наномасштабные элементы пищевого сырья позволяет дать принципиально новые подходы к организации процессов в пищевой индустрии. Инструментом такого управления может стать направленное энергетическое воздействие.

Для инициирования бародиффузии требуется четкое согласование структурных характеристик сырья, особенностей жидкой фазы и параметров ЭМП. Результатом организации таких процессов может быть: повышение выхода целевых компонентов, переход в раствор ценных компонентов, которые не извлекались традиционными методами (ароматических комплексов, компонентов вкуса и пр.), повышение эффективности использования энергии.

#### Литература (References)

- [1] Gabor D., Colombo U., King A. S. Beyond the age of waste: a report to the Club of Rome. Elsevier, 2016. 258 p.
- [2] Balin B. E., Akan D. M. EKC hypothesis and the effect of innovation: A panel data analysis. *Journal of Business Economics and Finance*, 2015, vol. 4, no.1, p. 81-91.
- [3] Ul'ev L.M., Vasil'ev M.A. Heat and power integration of processes for the refinement of coking products. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015. vol. 49, no. 5, p. 676-687.
- [4] Atamanyuk, V., Huzova, I., Gnativ, Z. Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production. *Food science and technology*, 2017. vol. 11, no.4, p. 21-28.
- [5] Hosovskyi R., Kindzera D., Atamanyuk V., Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks. *Chemistry & Chemical technology*. 2016, no. 10(4), p. 459-464.
- [6] Sorokovaya N.N., Cnezhkin Ju. F., Shapar R.A., Sorokovoy R.Ya. Sposob Sushki Termolabilnyih Materialov v Lentochnoy Ustanovke s Primeneniem Teplovogo Nasosa [The Method of Thermolabel Materials Drying in a Band Drying Unit Through Using a Thermal Pump]. *Scientific works (ONAFI)*, 2015, vol. 1, no. 47, p. 91-97.
- [7] Smirnov H.F., Zykov A.V., Reznichenko D.N. The determination of energy source optimal parameters for vacuum evaporation. *Scientific works (ONAFI)*, 2016, vol. 80, no. 1, p. 133-137.
- [8] Pappenheimer J.R., Renkin E.M., Borrero L.M. Filtration, diffusion and molecular sieving through peripheral capillary membranes: a contribution to the pore theory of capillary permeability. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 1951, vol. 167, no. 1, p. 13-46.
- [9] Bayfield J.E., Casati G., Guarneri I., Sokol D. W. Localization of classically chaotic diffusion for hydrogen atoms in microwave fields. *Physical review letters*, 1989, vol. 63, no 4, p. 364
- [10] Hinrikus H., Lass J., Karai D., Pilt K., Bachmann M. Microwave effect on diffusion: a possible mechanism for non-thermal effect. *Electromagnetic biology and medicine*, 2015, vol. 34, no. 4, p. 327-333.
- [11] Karabanov A., Wiśniewski D., Lesanovsky I., Köckenberger W. Dynamic nuclear polarization as kinetically constrained diffusion. *Physical review letters*, 2015, vol. 115, no. 2, p. 402-404.
- [12] Xu J., Chen Y., Deng L., Liu J., Cao Y., Li P., Wang Z. Microwave-activated nanodroplet vaporization for highly efficient tumor ablation with real-time monitoring performance *Biomaterials*, 2016, vol. 106, p. 264-275.
- [13] Haghi A.K., Amanifard N. Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2008, vol. 25, no. 3, p. 491-501.
- [14] Ramya H.G., Kumar S., Alam M.S. Microwave drying of fruits and vegetables: a fourth generation drying technology. *The Journal of Community Health Management*, 2015, vol. 2, no. 2, p. 85-88.
- [15] Izli N., Isik E. Color and microstructure properties of tomatoes dried by microwave, convective, and microwave-convective methods. *International journal of food properties*, 2015, vol. 18, no. 2, p. 241-249.
- [16] Pinho A.R.C., Assis F.R., Peres A.P., Pintado M.E., Morais A.M. Dehydration of cheese be hot air, microwave and freeze drying. *Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 2017, vol. 18, no. 4, p. 455-460.
- [17] Patil G.B., Pandey A.P., Patil V.S., Patil P.O., Bari S.B., Deshmukh P.K. Microwave Assisted Development and Statistical Optimization of Porous Tablet by Vaporization Technique. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Pharmacology*, 2014, vol. 1, no. 4, p. 254-263.
- [18] Zhang M., Tang J., Mujumdar A.S., Wang S. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, vol. 17, no. 10, p. 524-534.
- [19] Edwards A., Deen W.M., Daniels B.S. Hindered transport of macromolecules in isolated glomeruli. I. Diffusion across intact and cell-free capillaries. *Biophysical journal*, 1997, vol. 72, no. 1, p. 204-213.
- [20] Flyrez N., Conde E., Domínguez H. Microwave assisted water extraction of plant compounds. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2015. vol. 90, no. 4, p. 590-607.

- [21]Tewari S., Ramalakshmi K., Methre L., Mohan Rao L.J. Microwave-Assisted Extraction of Inulin from Chicory Roots Using Response Surface Methodology. *J. Nutr. Food Sci.*, 2015, vol. 5, p. 342-349.
- [22]Chemat F., Cravotto G. Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds: Theory and Practice. Food Engineering Series, 2013. 238 p.
- [23]Chan C.H., Lima J.J., Yusoff R., Ngoh G.C. A generalized energy-based kinetic model for microwave-assisted extraction of bioactive compounds from plants. *Water Environment Research*, 2015, vol. 88, no. 10, p. 1192-1229
- [24]Bhuyan D.J., Vuong Q.V., Chalmers A.C., van Altena I.A., Bowyer M.C., Scarlett C.J. Microwave-assisted extraction of Eucalyptus robusta leaf for the optimal yield of total phenolic compounds. *Industrial Crops and Products*, 2015. vol. 69, p. 1-10.
- [25]Pan X., Niu G., Liu, H. Microwave-assisted extraction of tea polyphenols and tea caffeine from green tea leaves. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2003, vol. 42, no. 2, p. 129-133.
- [26]Burdo O.G., Zykov A.V., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V. The Nanotechnological Innovation in Food Industry. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2016, vol.6, no.3, p. 144-150.
- [27]Lebovka E., Vorobiev F. Chemat Enhancing Extraction Processes in the Food Industry. By Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2012, 518 p.
- [28]Jacotet-Navarro M., Rombaut N., Fabiano-Tixier A.S., Danguien M., Bily A., Chemat F. Ultrasound versus microwave as green processes for extraction of rosmarinic, carnosic and ursolic acids from rosemary. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, vol. 27, p. 102-109.
- [29]Zeng H., Zhang Y., Lin S., Jian Y., Miao S., Zheng B. Ultrasonic–microwave synergistic extraction (UMSE) and molecular weight distribution of polysaccharides from *Fortunella margarita* (Lour.) Swingle. *Separation and Purification Technology*, 2015, vol. 144, p. 97-106.
- [30]Vinatoru M., Mason T.J., Calinescu I. Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials. *Trends in Analytical Chemistry*, 2017, p. 159-178.
- [31]Chung-Hung C., Jian-Jiun L., Yusoff L., Gek-Cheng R., Gek-Cheng N. A Generalized Energy-Based Kinetic Model for Microwave-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Plants. *Separation and Purification Technology*, 2015, vol. 143. p. 152-160.
- [32]Zhou T., Xiao X., Li G. Hybrid Field-Assisted Solid-Liquid-Solid Dispersive Extraction for the Determination of Organochlorine Pesticides in Tobacco with Gas Chromatography. *Anal. Chem.*, 2012, vol. 84, p. 420-427.
- [33]Wang C.C., Yau H.T. Application of hybrid microwave thermal extraction techniques for mulberry root bark. *Thermal Science*, 2013, vol. 17, no. 5, p. 1311-1315.
- [34]Kozlov G.V., Yanovskiy Yu.G., Zhirikova Z.M., Alov V.Z. Geometriya uglerodnykh nanotrubok v srede polimernykh kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy [Geometry of Carbon Nanotubes in Polymer Composite Materials and Constructions]. *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 2012, vol. 18, no.1, p. 131-153. (In Russian).
- [35]Burdo O., Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya J., Marenchenko E. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 4/11, no.88, p. 34-42.

**Сведения об авторах.**



**Бурдо Олег Григорьевич**, Одесская национальная академия пищевых технологий доктор технических наук. Сфера научных интересов: массообменные процессы; пищевые нанотехнологии. E-mail: [oleg-burdo@mail.ru](mailto:oleg-burdo@mail.ru)



**Сиротюк Илья Вадимович**, Одесская национальная академия пищевых технологий. Сфера научных интересов: процессы массопереноса, низкотемпературная выпарка в электромагнитном поле, пищевые нанотехнологии. E-mail: [ilyxin09@gmail.com](mailto:ilyxin09@gmail.com)



**Альхури Юсеф**, Одесская национальная академия пищевых технологий, аспирант, гражданин Сирийской арабской республики. Сфера научных интересов: процессы экстрагирования, фитопрепараты. E-mail: [Yosef-KH@live.com](mailto:Yosef-KH@live.com)



**Левтринская Юлия Олеговна**, Одесская национальная академия пищевых технологий, кандидат технических наук. Сфера научных интересов: экстрагирование в электромагнитном поле, пищевые концентраты. E-mail: [levtrinska@ukr.net](mailto:levtrinska@ukr.net)