



Процессы адресной доставки энергии и тепломассопереноса в системах с нано-, микро- и макроэлементами

А. В. Гаврилов , Ю. Б. Гербер

*Агротехнологическая академия КФУ имени В. И. Вернадского
(г. Симферополь, Российская Федерация)*

 tehfac@mail.ru

Аннотация

Введение. Производство современных технологий должно учитывать всесторонний анализ энергетических, биотехнологических и теплофизических явлений. Основными в пищевых технологиях являются процессы тепло- и массообмена, которые необходимо интенсифицировать.

Цель статьи. Исследование механизмов и моделирование кинетики тепломассопереноса в микроволновом поле в технологиях комплексной переработки пищевого сырья. **Материалы и методы.** Комбинация тепловых, гидродинамических и диффузионных движущих сил при их согласованном действии способна решать проблемные вопросы обработки сырья, в первую очередь пищевого. С помощью принципов теории подобия предлагается безразмерный комплекс – число энергетического действия, которое отражает влияние электромагнитного поля. Предложена классификация режимов потока из микро- и нанокapиллярной структуры.

Результаты исследования. Непосредственный, адресный, подвод энергии к жидкой фазе сырья дает возможности получения в аппарате твердой фазы. Это принципиально новые возможности процесса обезвоживания. Скорости выпаривания при постоянной мощности поля зависят только от типа растворителя. В результате обработки всех точек эксперимента было получено критериальное уравнение, которое устанавливает зависимость числа энергетического действия от безразмерного давления и безразмерной теплоты фазового перехода.

Обсуждение и заключение. Разработан новый класс тепломассообменного оборудования – электродинамические аппараты. Предложенные экспериментальные результаты предполагают, что при организации процессов адресной доставки энергии с привлечением импульсного микроволнового поля поток из капилляров и нанокapилляров инициируется гораздо быстрее. Важное преимущество электродинамических экстракторов – возможность получения полиэкстрактов. Пищевые технологии с организацией процессов адресной доставки энергии при выпарке, сушке и экстрагировании являются ресурсо- и энергоэффективными и обеспечивают полное сохранение потенциала сырья.

Ключевые слова: энергоемкость, теплообмен, массообмен, интенсификация, тепломассоперенос, микроволновое поле, адресная доставка энергии, диффузия, микрокапиллярная структура, нанокapиллярная структура, процесс обезвоживания, выпаривание

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б. Процессы адресной доставки энергии и тепломассопереноса в системах с нано-, микро- и макроэлементами // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 128–139. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.128-139>

Original article

Targeted Energy Delivery and Heat-Mass Transfer Processes in Systems with Nano-, Micro-, and Macroelements

A. V. Gavrilov , Yu. B. Gerber

Agrotechnological Academy of the V. I. Vernadsky
Crimean Federal University (Simferopol, Russian Federation)

 tehfac@mail.ru

Abstract

Introduction. The production of modern technologies should take into account a comprehensive analysis of energy, biotechnological and thermophysical phenomena. The main processes in food technologies are the processes of heat and mass transfer, which need to be intensified.

Aim of the Article. The aim of the work is studying the mechanisms and modeling the kinetics of heat and mass transfer in the microwave field in the technologies for complex processing of food raw materials.

Materials and Methods. The combination of thermal, hydrodynamic and diffusion driving forces with their coordinated action is able to solve problematic issues of processing raw materials, primarily food. Using the principles of the similarity theory, there is proposed a dimensionless complex – the number of energy action, which reflects the influence of the electromagnetic field.

Results. Direct, targeted energy supply to the liquid phase of raw materials makes it possible to obtain a solid phase in the apparatus. These are fundamentally new features for the dehydration process. Boil-off rates at constant electromagnetic field intensity depend only on the solvent type. As a result of processing all experimental points, a criterion equation was obtained, it establishes the dependence of the energy action number on the dimensionless pressure and the dimensionless heat of the phase transition.

Discussion and Conclusion. There are developed a new class of heat and mass exchange equipment – electrodynamic apparatuses. The experimental results suggest that the flow from capillaries and nano-capillaries is initiated much faster when organizing the processes of targeted energy delivery with the involvement of pulsed microwave field. An important advantage of electrodynamic extractors is the possibility of obtaining poly-extracts. Food technologies with targeted energy delivery during evaporating, drying and extracting are resource- and energy-efficient and ensure full preservation of raw material potential.

Keywords: energy intensity, heat exchange, mass transfer, intensification, heat and mass transfer, microwave field, targeted energy delivery, diffusion, microcapillary structure, nanocapillary structure, dehydration process, evaporation

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Gavrilov A.V., Gerber Yu.B. Targeted Energy Delivery and Heat-Mass Transfer Processes in Systems with Nano-, Micro-, and Macroelements. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):128–139. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.128-139>

Введение

Производство пищевых продуктов питания в странах с развитой экономикой характеризуется показателем энергоёмкости¹. Выбросы и отходы от производства продуктов питания загрязняют атмосферу и окружающую среду. В то же время технологии производства пищевых продуктов значительно отстают в практической реализации проектов инновации от других секторов экономики [1; 2]. При этом проблемы пищевых энергетических технологий в мире комплексно не решаются.

Сырьё для производства пищевых продуктов специфичное. Состоит из макро- и микроэлементов и элементов наноразмерного типа. Более того, пищевые технологии нацелены именно на объекты микро- и наноразмерного типа. Эти объекты обладают большим диффузионным сопротивлением и определяют энергоёмкость технологии, соотношение использованного сырья, а также сохранение пищевого потенциала. В связи с этим в отходах остается до 15–20 % целевых компонентов, которые находятся в микро- и нанокapиллярах и не извлекаются традиционными технологиями. Использование новых технологий в пищевой перерабатывающей промышленности даст возможность создавать новые продукты, принципиально отличающиеся от известных аналогов. Производство современных технологий должно учитывать всесторонний анализ энергетических, биотехнологических и теплофизических явлений. Основными процессами в пищевых технологиях являются процессы тепло- и массообмена, которые необходимо интенсифицировать. Эти процессы охватывают энергетику и качество пищевого готового продукта.

Цель исследования – анализ механизмов и моделирование кинетики тепломассопереноса в микроволновом поле (МВ-поле) в технологиях комплексной переработки пищевого сырья.

Обзор литературы

Этап развития общества неразрывно связан с ростом потребления энергоресурсов и снижением их запасов². В таких условиях возрастает роль экономически полезного расхода энергии, повышения энергетического коэффициента полезного действия инновационных технологий. В пищевых технологиях (ПТ) больше всего расходуется энергетических ресурсов, в основном в пищевом производстве происходит термическая обработка сырья [3]. А эффективность использования энергетических ресурсов и сырья остается на низком уровне [4; 5]. Если сравнить количество энергии, получаемое человеком с пищей, с затратам на ее производство, то получим энергетический КПД, который не превысит 10 % [6].

При снижении количества потребляемой энергии наблюдается повышение энергетического КПД ПТ, снижение себестоимости готового продукта и степени термического воздействия на него, а также сохранение термолабильных и биологически активных компонентов сырья.

Для ПТ характерны научные и технические противоречия. Известен факт, что при повышении температуры интенсифицируются процессы тепломассопереноса, но также происходит снижение пищевой ценности продукта вследствие разрушения функциональных компонентов сырья [7–9]. Известные технологии не позволяют разрешить эти противоречия.

Важным фактором ПТ является экологическая безопасность производства

¹ Gabor D., Colombo U., King A. S. Beyond The Age of Waste: a Report to the Club of Rome. Elsevier, 2016. 258 p. URL: Available at: <https://www.elsevier.com/books/beyond-the-age-of-waste/gabor/978-0-08-027303-7> (дата обращения: 27.09.2022); Рынок нано: от нанотехнологий к нанопродуктам / Г. Л. Азоев [и др.]. М. : БИНОМ, 2011. 319 с.

² Gabor D., Colombo U., King A. S. Beyond The Age of Waste...

продукта. При производстве в отходах ПТ содержится большое количество нужных компонентов, экономическая ценность которых в разы больше стоимости готового продукта. Традиционные технологии не позволяют их извлекать, потому что они находятся внутри клеток (размеры оболочек от 7 до 30 нм), в капиллярах сырья (размер от 5 нм).

Чтобы отходы пищевых технологий являлись полноценными источниками пищи, нужно разрабатывать инновационные и экономически эффективные принципы организации процессов ПТ. Предлагается процессы стерилизации, экстрагирования, биотехнологий, сушки, сокоотдачи и прочие осуществлять с помощью технологий адресной доставки энергии (АДЭ). Осуществляемые принципы при переводе пищевого производства на технологии АДЭ позволят в разы снизить энергоемкость, степень воздействия температур на пищевое сырье и готовый продукт, а также получить новые продукты, принципиально отличающиеся от аналогов.

Многие ученые занимаются поиском инновационных средств обработки пищевого сырья. К таким средствам относятся электрические и электромагнитные интенсификаторы. Наиболее мощными и энергоэффективными являются микроволновые (МВ) генераторы [10–12]. Инновационные технологии применения МВ-поля известны в мире и активно исследуются при выпаривании продуктов [13–15]. В Китае создана сушильная установка с МВ-подводом энергии для производства яблочных чипсов [16–18]. В Аргентине получены образцы сушеного картофеля и сушеной моркови в условиях МВ-поля при атмосферном давлении, при t до 30 °С в вакууме до 3 кПа [19–21]. В Турции проводились исследования процессов экстрагирования фенолов из черники в состоянии порошка 60-процентным водным раствором этанола [22–24]. По

результатам исследований получили 87-процентный экстракт.

Результаты этих исследований доказывают перспективность новых средств обработки пищевого сырья. Следует ожидать повышение показателей конечных концентраций при выпарке, снижение t обработки продукта, уменьшение экономических и энергетических затрат.

В статье определены задачи решения перечисленных проблем. Научная гипотеза работы – реализация эффекта адресной доставки энергии к необходимым элементам сырья при взаимодействии с электромагнитным полем [25–27].

Материалы и методы

Принятую классификацию процессов на механические, гидродинамические, тепловые и массообменные предлагается дополнить гибридными процессами, результат которых определяется последовательным действием нескольких движущих сил. Комбинация тепловых, гидродинамических и диффузионных движущих сил при их согласованном действии способна решать проблемные вопросы обработки сырья, в первую очередь пищевого. На основе предложенной концепции формулируются гипотезы (табл. 1).

Рассмотрим процесс тепломассопереноса с позиций классического уравнения Фика:

$$\frac{dC}{d\tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial C}{\partial x} w_x. \quad (1)$$

Первое слагаемое в (1) – это вялый процесс, воздействовать на который в условиях микро- и наномасштабных структур не удастся. Ставится задача активизировать возможности второго слагаемого и организовать транспорт компонентов из капилляров за счет гидродинамической движущей силы, увеличить скорость потока w_x . Эта движущая сила определяется разностью давлений внутри капилляра и в среде.

Энергетические и технологические противоречия пищевых производств
Energy and technological contradictions in food production

№	Задача / Task	Традиционные решения / Traditional solutions	Гипотезы / Hypotheses
1	Выпаривание растворов / Evaporation of solutions	Энергия подводится непосредственно к раствору теплопередачей / The energy is brought directly to the solution by heat transfer	Возможности АДЭ непосредственно к растворителю / Possibilities of targeted energy delivery directly to the solvent
2	Сушка сырья/ Raw material drying	Энергия направляется к промежуточному потоку, который в свою очередь трансформирует влагу в пар / The energy is directed to the intermediate stream, which in turn transforms the moisture into steam	Возможности АДЭ непосредственно к влаге в объеме продукта / Possibilities of targeted energy delivery directly to the moisture in the product volume
3	Сушка сырья / Raw material drying	Удаляемая влага из продукта переходит в паровую фазу / Moisture removed from the product passes into the vapor phase	Возможности удаления влаги в виде двухфазного потока / Moisture removal capabilities in the form of two-phase flow
4	Извлечение целевых компонентов / Extraction of target components	Растворение компонента с помощью экстрагента и с помощью процесса диффузии в экстракт / Dissolution of a component using an extractant and using a diffusion process into the extract	Возможности перехода целевых компонентов из межклеточного пространства, а также из клеток нерастворимых компонентов / Possibilities of transferring target components from intercellular space as well as from cells of insoluble components

Примечание: таблица составлена по материалам статьи О. Г. Бурдо [28]

Note: Table was compiled based on the materials of the article by O. G. Burdo

Но классическое уравнение гидравлики дополняется гидравлическим сопротивлением микроканала (диаметр d), вызванным силами поверхностного сопротивления σ :

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left[\frac{\lambda \cdot l}{d} + \sum \xi \right] + \rho \cdot gl + \frac{\sigma}{d}. \quad (2)$$

Запустить процесс транспортировки содержимого капилляров предложено с помощью электромагнитных источников энергии. Их влияние в уравнении энергии отражается как действие внутренних распределенных источников, мощность которых N в объеме V :

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_1 c_{1V} \rho_1}. \quad (3)$$

Индекс (1) в соотношении (3) относится к раствору в капилляре. Энергия поля избирательно поглощается полярными молекулами раствора. Максимальная температура окажется в глубине капилляра, там, где термическое сопротивление к среде максимально. Такое точечное повышение температуры приведет к локальному образованию паровой фазы, резкому росту давления в глубине капилляра, инициирует гибридный поток, который и выбрасывает содержимое через открытый торец в среду. Это явление назовем механодиффузией³ [29–31].

О. Г. Бурдо и соавторы отмечают: в связи с тем, что процесс АДЭ осуществляется гидродинамической движущей силой, которая во много раз больше традиционного диффузионного потока, возникает трудность определить влияние данного потока в традиционных уравнениях массопереноса. С помощью

³ Gremenok V. F. Thin Film Solar Cells Based on Cu (In, Ga) Se2 // ECOBALTICA № 2008: Proceedings of the VI International Youth Environmental Forum. 2006. P. 24–28.

принципов теории подобия предлагается безразмерный комплекс – число энергетического действия B_u [28], которое отражает влияние электромагнитного поля. Число B_u отражает зависимость расходов энергии предлагаемой технологии Q и традиционной технологии: $B_u = Q / Q_o$. Для рассматриваемых процессов с помощью методов теории подобия установлены структуры моделей с обобщенными переменными и соотношения для расчета числа B_u (табл. 2) [28].

Механизмы транспортных процессов в микро- и нанокapиллярах

Предложена классификация режимов потока из микро- и нанокapиллярной структуры (рис. 1). Во-первых, это ламинарная бародиффузия, которая интенсифицирует внутридиффузионный массоперенос. Влага подается из объема сырья на поверхность фазового контакта и традиционным диффузионным потоком (диффузионное сопротивление в стесненных условиях капилляра R_c), но также

бародиффузионным потоком (гидравлическое сопротивление R_b). Во-вторых, это турбулентная бародиффузия, которая интенсифицирует и внутри- и внешнедиффузионный массоперенос. В среду выносятся 2 потока: традиционный J_d и гидродинамический J_b . В-третьих, это специфичный гибридный поток, который переносит и растворимые, и нерастворимые экстрагентом компоненты («механодиффузия» [21]).

Результаты исследования

Гипотеза доказана экспериментально. Исследования проводились на модели сырья (рис. 2). Капилляр заполняли водой, которая подкрашивалась чернилами. В оболочке сырья содержалось 3 капилляра. Модель сырья (оболочка с капиллярами) располагалась в термостате и в камере с МВ-генератором (рис. 2). Схема установки и результаты процесса бародиффузии показаны на рисунке 2.

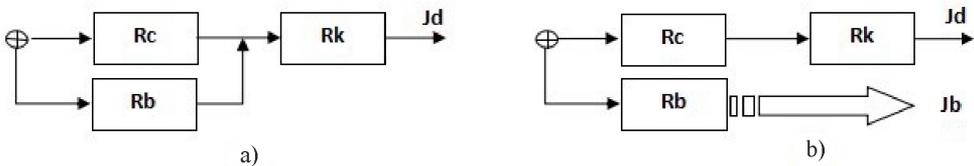
Анализ результатов представлен в таблице 3.

Т а б л и ц а 2
Table 2

**Расчетные модели
Calculation models**

Процесс / Process	Число B_u / Number of B_u	Модель процесса / Process model
Активация и инаktivация микроорганизмов / Activation and inactivation of microorganisms	$B_u = N(\zeta V C p \Delta t \rho)^{-1}$	$F_o = A R e^n P r^m B u^k$
Экстрагирование / Extracting	$B_u = N(r w d^2 \rho)^{-1}$	$S_h = A R e^n S c^m B u^k$
Сушка / Drying	$B_u = N(r V \rho)^{-1}$	$S_h = A R e^n S c^m P e^p B u^k$
Выпаривание / Evaporation	$B_u = N(r V \rho)^{-1}$	$B_u = A R^n P^q$

В соотношениях принято: N – мощности излучения; V – объемный расход удаляемой влаги; r – скрытая теплота фазового перехода; d – определяющий размер; ρ – плотность / The ratios assume: N – radiation power; V – volume flow rate of moisture removed; r – latent heat of phase transition; d – defining dimension; ρ – density



Р и с. 1. Схемы транспортных процессов при бародиффузии: а) ламинарная; б) турбулентная
F i g. 1. Schemes of transport processes during barodiffusion: a) laminar; b) turbulent



Р и с. 2. Модель сырья в МВ-камере
F i g. 2. Model of raw materials in the MV-chamber

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Результаты визуального исследования
Results of visual studies

№	Стенд / Stand	Время, с / Time, s	Температура, °С / Temperature, °C	Характеристики процесса / Process features
1	Термостат / Thermostat	7 200	90	Из капилляров испарилось около 1 % воды. Чернила не выходили / About 1% of the water evaporated from the capillaries. The ink did not come out
		16	66	Наблюдалось вытекание подкрашенной жидкости из капилляра 1, появление пузырьков пара в капиллярах 2 и 3 / Dyed liquid leaked from capillary 1, vapor bubbles appeared in capillaries 2 and 3
2	МВ-камера / MV-camera	36	66	Капилляр 1 оказался пустым / Capillary 1 was empty
		56	66	Наблюдалось вытекание подкрашенной жидкости из капилляров 2 и 3 / Dyed liquid was observed leaking from capillaries 2 and 3
		74	66	Все капилляры оказались пустыми / Все капилляры оказались пустыми

Стендовые испытания микроволнового вакуум-выпарного аппарата

Проведение процесса выпаривания при ГУ 2 рода (в отличии от 1 и 3 рода в традиционных аппаратах) предопределяет преимущества: возможность получения высококонцентрированных растворов. В инновационных аппаратах нет классической теплопередачи, нет проблемы пограничного слоя. Непосредственный, адресный, подвод энергии

к жидкой фазе сырья дает возможность получения в аппарате твердой фазы. Это принципиально новые возможности процесса обезвоживания. Скорости выпаривания при постоянной мощности поля зависят только от типа растворителя.

Определено, что скорость влагоизвлечения в спиртосодержащих системах в 2,0–2,5 раза выше, чем в водорастворимых, а в растворах на основе ацетона – в 5 раз. Давление в системе

не превышало 10 кПа, что обеспечило процесс выпаривания при относительно низкой температуре 20–45 °С. Конечная концентрация сухих веществ дошла до 80–95 %*w*_г, это выше на 20–25 %, по сравнению с известными установками.

В качестве базовых значений принято: давление $P_o = 10$ кПа; теплота фазового перехода $R_o = 525$ кДж/кг.

Обсуждение и заключение

В статье с помощью видеосъемки доказан факт существования гидродинамического потока из каналов капилляров сырья.

Подтверждена гипотеза, сформулированная выше, что центры парообразования образуются в глубине капилляров. Установлено, что первоначально образуются центры парообразования в каналах капилляров, расположенных близко к генератору энергии.

Установлено, что процессом образования бародиффузионного потока, а также его мощностью возможно управлять. Факторами для управления процессом являются мощность и направленное электромагнитное излучение, при условии их согласования со структурой сырья и диаметрами капилляров.

Также видеосъемка доказывает, что характер потока отличается от классической бародиффузии. Большая концентрация электромагнитной энергии в точке объема капилляра практически приводит к фазовому переходу, ускоренному росту объема пара и моментальному видоизменению гидродинамической ситуации в капилляре. В результате происходит резкий выброс содержимого капилляра

и, следовательно, разрыв клеточной оболочки с выбросом содержимого клетки.

Для наноиндустрии созданы образцы техники, которые реализуют эффект «механодиффузии». Разработан новый класс теплообменного оборудования – электродинамические аппараты. Получены совершенно новые результаты по интенсификации теплообмена. Предложенные экспериментальные результаты предполагают, что при организации процессов адресной доставки энергии с привлечением импульсного МВ-поля поток из капилляров и нанокапилляров инициируется гораздо быстрее. Важное преимущество электродинамических экстракторов – возможность получения полиэкстрактов.

Проведение процесса выпаривания при ГУ 2 рода (в отличие от 1 и 3 рода в традиционных аппаратах) предопределяет преимущества: возможность получения высококонцентрированных растворов. В инновационных аппаратах нет классической теплопередачи, нет проблемы пограничного слоя. Непосредственный, адресный, подвод энергии к жидкой фазе сырья дает возможность получения в аппарате твердой фазы. Это принципиально новые возможности процесса обезвоживания. Скорости выпаривания при постоянной мощности поля зависят только от типа растворителя.

Пищевые технологии с организацией процессов адресной доставки энергии при выпарке, сушке и экстрагировании являются ресурсо- и энергоэффективными и обеспечивают полное сохранение потенциала сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nanobiotechnology Approaches for Engineering Smart Plant Sensors / J. P. Giraldo [et al.] // Nature Nanotechnology. 2019. Vol. 14, Issue 6. P. 541–553. doi: <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0470-6>
2. Rawal M., Singh A., Amiji M. M. Quality-by-Design Concepts to Improve Nanotechnology-Based Drug Development // Pharmaceutical Research. 2019. Vol. 36, Issue 11. doi: <https://doi.org/10.1007/s11095-019-2692-6>

3. Understanding and Managing the Food-Energy-Water Nexus—Opportunities for Water Resources Research / X. Cai [et al.] // *Advances in Water Resources*. 2018. Vol. 111. P. 259–273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014>
4. Clapp J., Newell P., Brent Z. W. The Global Political Economy of Climate Change, Agriculture and Food Systems // *The Journal of Peasant Studies*. 2018. Vol. 45, Issue 1. P. 80–88. doi: <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602>
5. Govindan K. Sustainable Consumption and Production in the Food Supply Chain: a Conceptual Framework // *International Journal of Production Economics*. 2018. Vol. 195. P. 419–431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003>
6. Hosovskyi R. Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks // *Chemistry & Chemical Technology*. 2016. Vol. 10, Issue 4. P. 459–464. doi: <https://doi.org/10.23939/chcht10.04.459>
7. Sabarez H. T. Thermal Drying of Foods // *Fruit Preservation*. Food Engineering Series ; A. Rosenthal, R. Deliza, J. Welti-Chanes, G. Barbosa-Cánovas (eds). New York : Springer, 2018. P. 181–210. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_7
8. Combined Drying of Apple Cubes by Using of Heat Pump, Vacuum-Microwave, and Intermittent Techniques / C. H. Chong [et al.] // *Food Bioprocess Technol*. 2014. Vol. 7, Issue 4. P. 975–989. doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1123-7>
9. Kumar C., Karim M. A. Microwave-Convective Drying of Food Materials: A Critical Review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 59, Issue 3. P. 379–394. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
10. Microwave Vacuum Drying and Multi-Flash Drying of Pumpkin Slices / R. L. Monteiro [et al.] // *Journal of Food Engineering*. 2018. Vol. 232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015>
11. Multi-Scale Model of Food Drying: Current Status and Challenges / M. M. Rahman [et al.] // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. Vol. 58, Issue 5. P. 858–876. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1227299>
12. Bozkir H., Baysal T. Concentration of Apple Juice Using a Vacuum Microwave Evaporator as a Novel Technique: Determination of Quality Characteristics // *Journal of Food Process Engineering*. 2017. Vol. 40, Issue 5. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12535>
13. Kumar A., Shrivastava S. L. Temperature, Concentration, and Frequency Dependent Dielectric Properties of Pineapple Juice Relevant to Its Concentration by Microwave Energy // *Journal of Food Process Engineering*. 2019. Vol. 42, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13013>
14. Influence of Three Different Concentration Techniques on Evaporation Rate, Color and Phenolics Content of Blueberry Juice / A. Elik [et al.] // *Journal of Food Science and Technology*. 2016. Vol. 53, Issue 5. P. 2389–2395. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2213-0>
15. Drying Characteristics and Modeling of Apple Slices during Microwave Intermittent Drying / J.-W. Dai [et al.] // *Journal of Food Process Engineering*. 2019. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13212>
16. Arballo J. R., Campañone L. A., Mascheroni R. H. Study of Microwave Drying of Vegetables by Numerical Modeling. Influence of Dielectric Properties and Operating Conditions // *Food Science and Technology Research*. 2018. Vol. 24, Issue 5. P. 811–816. doi: <https://doi.org/10.3136/fstr.24.811>
17. Elik A., Yanik D. K., Göğüş F. Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolics from Blueberry // *Romanian Biotechnological Letters*. 2019. Vol. 24, Issue 1. P. 30–40. doi: <https://doi.org/10.25083/rbl/24.1/30.40>
18. Burdo O. G., Bandura V. N., Levtrinskaya Y. O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 54, Issue 2. P. 210–218. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068375518020047>
19. Microwave Energy, as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polydisperse Extract Formation / O. G. Burdo [et al.] // *Problemele Energeticii Regionale*. 2018. Vol. 1, Issue 36. P. 58–71. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1217259>
20. Burdo O. G. Nanoscale Effects in Food-Production Technologies // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005. Vol. 78, Issue 1. P. 90–96. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-005-0033-6>
21. Технологии селективного подвода энергии при выпаривании пищевых растворов / О. Г. Бурдо [и др.] // *Проблемы региональной энергетики*. 2017. № 1. С. 100–109. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29043965> (дата обращения: 27.09.2022).

22. Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes / O. Burdo [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4, Issue 11. P. 34–42.
23. Гаврилов А. В. Исследование энерготехнологий процессов обезвоживания растительного сырья // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2018. Вып. 16. С. 82–89. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36774234> (дата обращения: 27.09.2022).
24. Studying the Operation of Innovative Equipment for Thermomechanical Treatment and Dehydration of Food Raw Materials / O. Burdo [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. P. 24–32. URL: https://www.researchgate.net/publication/337229212_Studying_the_operation_of_innovative_equipment_for_thermomechanical_treatment_and_dehydration_of_food_raw_materials (дата обращения: 27.09.2022).
25. Energy Monitoring of Innovative Energy Technologies of Plant Raw Material Processing / O. G. Burdo [et al.] // Problemele Energeticii Regionale. 2019. Vol. 2, Issue 43. P. 23–38. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3367058>
26. Гаврилов А. В. Анализ современных энерготехнологий переработки растительного сырья // Вестник Московского государственного агроинженерного университета им. В. П. Горячкина. 2019. № 5. С. 31–39. doi: <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-31-39>
27. Development of Power-Efficient and Environmentally Safe Coffee Product Technologies / O. Burdo [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 11, Issue 103. P. 6–14. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/b42c/578cef37a69eccc671825a5e20d950ec14f1.pdf> (дата обращения: 27.09.2022).
28. Технологии адресной доставки энергии и термотрансформации при производстве продуктов питания / О. Г. Бурдо [и др.] // Проблемы региональной энергетики. 2016. Вып. 2. С. 55–68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26638640> (дата обращения: 27.09.2022).
29. Гаврилов А. В. Экспериментальное моделирование процессов выпаривания водных растворов в условиях вакуума и микроволнового поля // Вестник Московского государственного агроинженерного университета им. В. П. Горячкина. 2020. Вып. 1. С. 41–50. doi: <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2020-1-41-50>
30. Determination of Basic Parameters of Solarpanels / К. Тепе [et al.] // Международный научный журнал: Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 2. С. 22–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14671143> (дата обращения: 27.09.2022).
31. Prosekov A. Y., Ivanova S. A. Food Security: The Challenge of the Present // Geoforum. 2018. Vol. 91. P. 73–77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>

Поступила 01.11.2022; одобрена после рецензирования 11.12.2022; принята к публикации 28.12.2022

Об авторах:

Гаврилов Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии КФУ имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, пос. Аграрное), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, Researcher ID: [AAH-5137-2019](https://orcid.org/0000-0003-3382-0307), tehfac@mail.ru

Гербер Юрий Борисович, доктор технических наук, заместитель директора, заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии КФУ имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, пос. Аграрное), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: [B-6690-2019](https://orcid.org/0000-0003-3224-6833), gerber_1961@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. В. Гаврилов – общая идея, обоснование цели и задач проведения эксперимента, проведение исследований.

Ю. Б. Гербер – техническое обеспечение проведения экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Giraldo J.P., Wu H., Newkirk G.M., et al. Nanobiotechnology Approaches for Engineering Smart Plant Sensors. *Nature Nanotechnology*. 2019;14(6):541–553. doi: <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0470-6>
Electrical technologies and equipment

2. Rawal M., Singh A., Amiji M.M. Quality-by-Design Concepts to Improve Nanotechnology-Based Drug Development. *Pharmaceutical Research*. 2019;36(11). doi: <https://doi.org/10.1007/s11095-019-2692-6>
3. Cai X., Wallington K., Shafiee-Jood M., Marston L. Understanding and Managing the Food-Energy-Water Nexus—Opportunities for Water Resources Research. *Advances in Water Resources*. 2018;111:259–273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014>
4. Clapp J., Newell P., Brent Z.W. The Global Political Economy of Climate Change, Agriculture and Food Systems. *The Journal of Peasant Studies*. 2018;45(1):80–88. doi: <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602>
5. Govindan K. Sustainable Consumption and Production in the Food Supply Chain: a Conceptual Framework. *International Journal of Production Economics*. 2018;195:419–431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003>
6. Hosovskyi R. Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks. *Chemistry & Chemical Technology*. 2016;10(4):459–464. doi: <https://doi.org/10.23939/chcht.10.04.459>
7. Sabarez H.T. Thermal Drying of Foods. In: Rosenthal A., Deliza R., Welti-Chanes J., Barbosa-Cánovas G. (eds). *Fruit Preservation*. Food Engineering Series. New York: Springer. 2018. p. 181–210. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_7
8. Chong C.H., Figie A., Law C.L., Wojdyło A. Combined Drying of Apple Cubes by Using of Heat Pump, Vacuum-Microwave, and Intermittent Techniques. *Food Bioprocess Technol.* 2014;7(4):975–989. doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1123-7>
9. Kumar C., Karim M.A. Microwave-Convective Drying of Food Materials: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 59, Issue 3. P. 379–394. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
10. Monteiro R.L., Link J.V., Tribuzi G., et al. Microwave Vacuum Drying and Multi-Flash Drying of Pumpkin Slices. *Journal of Food Engineering*. 2018;232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015>
11. Rahman M.M., Joardder M.U.H., Khan M.I.H., et al. Multi-Scale Model of Food Drying: Current Status and Challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018;58(5):858–876. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1227299>
12. Bozkir H., Baysal T. Concentration of Apple Juice Using a Vacuum Microwave Evaporator as a Novel Technique: Determination of Quality Characteristics. *Journal of Food Process Engineering*. 2017;40(5). doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12535>
13. Kumar A., Shrivastava S.L. Temperature, Concentration, and Frequency Dependent Dielectric Properties of Pineapple Juice Relevant to Its Concentration by Microwave Energy. *Journal of Food Process Engineering*. 2019;42(1). doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13013>
14. Elik A., Yanik D.K., Maskan M., Göğüş F. Influence of Three Different Concentration Techniques on Evaporation Rate, Color and Phenolics Content of Blueberry Juice. *Journal of Food Science and Technology*. 2016;53(5):2389–2395. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2213-0>
15. Dai J.-W., Xiao H.-W., Zhang L.-H., et al. Drying Characteristics and Modeling of Apple Slices during Microwave Intermittent Drying. *Journal of Food Process Engineering*. 2019. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13212>
16. Arballo J.R., Campañone L.A., Mascheroni R.H. Study of Microwave Drying of Vegetables by Numerical Modeling. Influence of Dielectric Properties and Operating Conditions. *Food Science and Technology Research*. 2018;24(5):811–816. doi: <https://doi.org/10.3136/fstr.24.811>
17. Elik A., Yanik D.K., Göğüş F. Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolics from Blueberry. *Romanian Biotechnological Letters*. 2019;24(1):30–40. doi: <https://doi.org/10.25083/rbl/24.1/30.40>
18. Burdo O.G., Bandura V.N., Levtrinskaya Y.O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018;54(2):210–218. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068375518020047>
19. Burdo O.G., Syrotuk I.V., Alhury U., Levtrinska J.O. Microwave Energy, as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polydisperse Extract Formation. *Problemele Energeticii Regionale*. 2018;1(36):58–71. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1217259>
20. Burdo O.G. Nanoscale Effects in Food-Production Technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005;78(1):90–96. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-005-0033-6>

21. Burdo O.G., Burdo A.K., Sirotiyuk I.V., Pur D.S. [Technologies of Selective Energy Input in Evaporation of Food Solutions]. *Problems of the Regional Energetics*. 2017;(1):100–109. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29043965> (accessed 27.09.2022). (In Russ.)
22. Burdo O., et al. Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017;4(11):34–42.
23. Gavrillov A.V. Researching of Process Energy Technologies Development of Vegetative Raw Materials. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2018;16:82–89. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36774234> (accessed 27.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
24. Burdo O., Bezbakh I., Zykov A., Kepin N. Studying the Operation of Innovative Equipment for Thermomechanical Treatment and Dehydration of Food Raw Materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. p. 24–32. Available at: https://www.researchgate.net/publication/337229212_Studying_the_operation_of_innovative_equipment_for_thermomechanical_treatment_and_dehydration_of_food_raw_materials (accessed 27.09.2022).
25. Burdo O.G., Gavrillov A.V., Kashkano M.V., et al. Energy Monitoring of Innovative Energy Technologies of Plant Raw Material Processing. *Problemele Energeticii Regionale*. 2019;2(43):23–38. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3367058>
26. Gavrillov A.V. Energy Sources in Innovative Energy Technologies of Vegetable Processing. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta im. V. P. Goryachkina*. 2019;(5):31–39. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-31-39>
27. Burdo O., Bezbakh I., Zykov A., et al. Development of Power-Efficient and Environmentally Safe Coffee Product Technologies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020;11(103):6–14. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/b42c/578cef37a69eccc671825a5e20d950ec14f1.pdf> (accessed 27.09.2022).
28. Burdo O.G., Shit M.L., Zykov A.V., et al. [Targeted Energy Delivery and Thermo-Transformation Technologies in Food Production]. *Problems of the Regional Energetics*. 2016;2:55–68. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26638640> (accessed 27.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
29. Gavrillov A.V. Experimental Modeling of the Vaporization of Liquid Solutions under Vacuum and Microwave Field Conditions. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta im. V. P. Goryachkina*. 2020;(1):41–50. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2020-1-41-50>
30. Tepe K., Agbenotowossi K., Djeteli G., et al. Determination of Basic Parameters of Solarpanels. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal: Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2010;(2):22–27. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14671143> (accessed 27.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
31. Prosekov A.Y., Ivanova S.A. Food Security: The Challenge of the Present. *Geoforum*. 2018;91:73–77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>

Submitted 01.11.2022; revised 11.12.2022; accepted 28.12.2022

About the authors:

Aleksandr V. Gavrillov, Cand.Sci (Engr.), Associate Professor of the Chair of Technology and Equipment for Producing and Processing of Livestock Products, Agrotechnological Academy of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, Researcher ID: AAH-5137-2019, tehfac@mail.ru

Yuriy B. Gerber, Dr.Sci. (Engr.), Deputy Director, Head of the Chair of Technology and Equipment for Producing and Processing Livestock Products, Agrotechnological Academy of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, gerber_1961@mail.ru

Authors contribution:

A. V. Gavrillov – general idea, justification of the purpose and objectives of the experiment, conducting research.

Yu. B. Gerber – technical support for conducting experiments.

All authors have read and approved the final manuscript.