

Energetics and Kinetics of Plant Raw Material Dehydration Processes

Burdo O.G.¹, Terziev S.G.², Burdo A.K.¹, Sirotiyuk I.V.¹, Pylypenko E.A.¹,
Akimov A.V.¹, Molchanov M.Yu.¹

¹Odessa National University of Technology, Odesa, Ukraine

²PRJSC “ENNI FOODS”, Odesa, Ukraine

Abstract. The aim of this work is the energy-efficient equipment creation for production of a high-quality dry product from a plant raw material and development of scientific and engineering foundation for the design of such an equipment. The achievement of this aim lies in a deep analysis of tendency in the development of a drying theory and technique. The graph is presented, on the basis of which the development of heat and moisture transfer model of A.V. Lykov is given, taking into account the P. A. Rebinder moisture bond forms specificity. The problems of convective drying modern technologies are determined; the reasons of high-energy consumption during their work are substantiated. The electrodynamic dehydrators classification is given, which considers the combined simple modes (drying) and hybrid dehydration modes. On the basis of the first law of thermodynamics, the possibility of a significant decrease in energy consumption is shown by the organization of a “vapordynamic” effect. The most significant result of the work is the construction of the electrodynamic apparatus module for dehydration of food and medicinal plant raw material. By the combination of electromagnetic field with the filtration process the specific energy consumptions were 1.9 MJ per 1 kg of the removed moisture, at the hybrid processes — juice yield exceeded vapor yield by 3.5 times. The significance of the work consists in the fact that the scientific conception of the authors on the possibilities of the significant decrease in energy consumption during the raw material dehydration at the innovative electrodynamic type apparatuses was practically proven.

Keywords: electrodynamic apparatuses, energy technologies, drying, dehydration, mathematical and experimental modeling, food and medicinal plant raw material.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.09>

UDC: [620.9+537.8]:66.047.3.011:67.03:621.31

Energetică și cinetică a proceselor de dehidratare a proceselor de dehidratare a materiei prime vegetale
Burdo O.G.¹, Terziev S.G.², Burdo A.K.¹, Sirotiuc I.V.¹, Pilipenco E.A.¹, Akimov A.V.¹, Molcianov M.Iu.¹

¹Universitatea națională tehnologică din Odesa, Odesa, Ucraina

²SAP «Enny Foods», Odesa, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este crearea echipamentelor eficiente din punct de vedere energetic pentru producerea produselor uscate de înaltă calitate din materiale vegetale și elaborarea unor baze fundamentale științifice și inginerești pentru proiectarea unor astfel de echipamente. Pentru a atinge acest obiectiv, a fost efectuată o analiză profundă a tendințelor de dezvoltare a teoriei și tehnologiei uscării. Este prezentat un grafic, pe baza căruia a fost elaborat modelul A.V. Lykov, ținând cont de specificul formelor de legătură de umiditate P.A. Relegator. Sunt determinate problemele tehnologiilor moderne de uscare convectivă, sunt fundamentate motivele costurilor mari ale energiei în timpul funcționării acestora. Sunt propuse principiile reducerii costurilor energetice în dispozitivele inovatoare de dehidratare a alimentelor și a materialelor vegetale medicinale. Sunt fundamentate perspectivele dispozitivelor de tip electrodinamic pentru implementarea tehnologiei acțiunii energetice dirijate. Cel mai important rezultat al lucrării este proiectarea modulului aparatului electrodinamic pentru dehidratarea alimentelor și a materialelor vegetale medicinale. Când câmpul electromagnetic a fost combinat cu procesul de filtrare, consumul specific de energie a fost de 1,9 MJ per 1 kg de umiditate îndepărtată; în procesele hibride, randamentul de suc a fost de 3,5 ori mai mare decât randamentul de abur. Pentru evaluarea eficienței dispozitivelor electrodinamice a fost utilizat numărul de acțiuni energetice propus de autori. Acest număr a generalizat cu succes bazele datelor experimentale obținute în timpul dehidratării feliilor de legume în câmpuri cu infraroșu și microunde. Semnificația lucrării constă în faptul că s-a dovedit practic conceptul științific al autorilor asupra posibilităților unei reduceri semnificative a costurilor energetice în timpul dehidratării materiilor prime în dispozitive inovatoare de tip electrodinamic.

Cuvinte-cheie: dispozitive electrodinamice, tehnologii energetice, uscare, dehidratare, modelare matematică și experimentală, materiale alimentare și vegetale medicinale.

Энергетика и кинетика процессов дегидратации растительного сырья
**Бурдо О.Г.¹, Терзиев С.Г.², Бурдо А.К.¹, Сиротюк И.В.¹, Пилипенко Е.А.¹, Акимов А.В.¹,
 Молчанов М.Ю.¹**

¹Одесский национальный технологический университет, Одесса, Украина

²ЧАО «Энни Фудз», Одесса, Украина

Аннотация. Цель работы — создание энергоэффективного оборудования для производства высококачественного сухого продукта из растительного сырья и разработка научных и инженерных основ проектирования такого оборудования. Для достижения поставленной цели проведен глубокий анализ тенденций развития теории и техники сушки. Приведен граф, на основе которого дано развитие модели тепловлагоденоса А.В. Лыкова, учитывающее специфику форм связи влаги П.А. Ребиндера. Определены проблемы современных технологий конвективной сушки, обоснованы причины высоких энергетических затрат при их работе. Предложены принципы снижения энергетических затрат в инновационных аппаратах для обезвоживания пищевого и лекарственного растительного сырья. Обоснованы перспективы аппаратов электродинамического типа для реализации технологии направленного энергетического действия. Дана классификация электродинамических дегидраторов, предусматривающая простые режимы (сушку), комбинированные и гибридные процессы обезвоживания. На базе первого закона термодинамики показана возможность существенного снижения энергетических затрат за счет организации «пародинамического» эффекта. В комбинированных процессах влага из объема сырья доставляется бародиффузионным механизмом на поверхность, а дальше организуется мощный механический поток с поверхности. В гибридных процессах организуется отвод сока и пара. Наиболее существенным результатом работы является конструкция модуля электродинамического аппарата для дегидратации пищевого и лекарственного растительного сырья. При комбинации электромагнитного поля с процессом фильтрации удельные затраты энергии составили 1,9 МДж на 1 кг удаленной влаги, в гибридных процессах — выход сока в 3,5 раза превысил выход пара. Для оценки эффективности электродинамических аппаратов использовалось предложенное авторами число энергетического действия. Это число удачно обобщило базы экспериментальных данных, полученных при дегидратации слайсов овощей в инфракрасном и в микроволновом полях. Значимость работы заключается в том, что практически доказана научная концепция авторов о возможностях существенного снижения энергетических затрат при обезвоживании сырья в инновационных аппаратах электродинамического типа.

Ключевые слова: электродинамические аппараты, энерготехнологии, сушка, дегидратация, математическое и экспериментальное моделирование, пищевое и лекарственное растительное сырье.

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение плодов и овощей методом сушки является одним из самых старых видов консервирования. Сушеные овощи и плоды содержат незначительное количество влаги (8—25%), что обеспечивает их длительное хранение, высокую сохранность качества и питательных веществ. Сушеные фрукты и ягоды используются для компотов и приправ в зимнее время, сушеные овощи — для производства разных блюд [1]. При сушке масса продукта уменьшается на 75—80%, что значительно сокращает затраты при транспортировке на дальние расстояния.

Наибольшее распространение получила конвективная сушка, при которой материал сушки (плоды и овощи) непосредственно контактируют с теплоносителем, нагреваются и отдают влагу. На этом принципе работает большая часть сушильного оборудования.

По своей физической сущности сушка является сложным процессом, скорость которого определяется скоростью диффузии (перемещения) влаги из глубины

высушиваемого продукта в окружающую среду.

Сушка является заключительным этапом многих пищевых технологий. Часто энергоемкий процесс сушки определяет себестоимость готового продукта. Для подавляющего большинства пищевых технологий удельные затраты теплоты составляют 7—8 МДж на 1 кг испаренной влаги.

Основная причина высокой энергоемкости конвективного способа сушки — крайне низкая эффективность многократных преобразователей энергии и систем ее транспортировки.

Фундаментальные основы теории сушки сложились к середине прошлого столетия и базируются на работах А.В. Лыкова и П.А. Ребиндера [2—4]. Основываясь на этих положениях, развиваются несколько научных направлений в теории сушки. Аналитические исследования посвящаются моделям градиентного переноса и термодинамическим моделям. Феноменологическая модель А.В. Лыкова дополняется соотношениями для

учета деформаций в материале [5]. Углубленный анализ кинетики сушки проводится в ИТТФ под руководством А.А. Долинского [6]. В работах Ю.Ф. Снежкина и Н.И. Никитенко предложена оригинальная модель влагообмена [7], решаются проблемы повышения энергетической эффективности сушилок [8].

Термодинамические основы сушки развиты как самостоятельное направление под руководством М.А. Гришина в харьковском центре сушки Н.И. Погожих и В.А. Потаповым [9]. Вместе с тем, аналитическое моделирование сушки хоть и имеет фундаментальный характер, дает только качественные результаты. Поэтому интенсивно развивается теория экспериментального моделирования сушки. Удачный шаг приближения теоретических основ к прикладным задачам сделан Г.К. Филоненко и М.А. Гришиным. Разработанный ими метод обобщения результатов экспериментальных исследований получает широкое распространение [9]. Глубокий анализ сушильной техники сделан в справочнике [10]. Известны модели, которые получены Лебедевым П.Д., Муштаевым В.И. и Плановским А.Н. на основе методов теории подобия [11, 12]. Весомый вклад в развитие теории и техники сушки внесли Красников В.В., Кремнев О.А., Куц П.С., Леончик Б.И., Сажин Б.С., Романков П.Г. Рабинович Г.Д., и др. Усилиями выдающихся ученых созданы научные школы и центры сушки. Развитие фундаментальных и прикладных представлений в разнообразных задачах сушки получило в работах Рудобашты С.П., Коновалова В.И., Лебедева Д.П., Острикова А.Н., Ефремова Г.И. (Россия), Акулича П.В., Павлюкевича Н.В. (Беларусь), Лупашко А.С. (Молдова), Календерьян В.А., Малецкой К.Д., Ханика Я.М. (Украина) и др. [13—16].

Техника сушки развивалась по пути преимущественного наращивания конвективных сушилок [10]. Привлекательность этого способа сушки объясняется следующими обстоятельствами. Технически просто нагреть воздух, с помощью которого передать энергию высушиваемому продукту. Поток этого воздуха являлся и средой, воспринимающей влагу из продукта. Задача интенсивного

переноса энергии от теплоносителя требовала перекачки в установке больших объемов воздуха. Разные технологии сушки устанавливали рекомендуемые температуры отработавшего теплоносителя. В пищевых технологиях диапазон температур выбросов изменяется в диапазоне 55—150°C. Серьезный температурный потенциал выбросов и огромные их объемы приводят к значительным потерям энергии с отработавшим теплоносителем. Практически во всех конвективных сушилках больше половины затраченной в технологии энергии теряется. В условиях умеренных цен на энергоносители конвективные технологии сушки были вполне оправданными и их распространение целесообразно. Но ситуация на современных рынках энергоносителей, динамичные тенденции роста цен требуют неотложных решений по внедрению прогрессивных подходов в технологиях сушки, важным критерием оценки которых стали бы и энергетические характеристики (Бурдо О.Г., *Эволюция сушильных установок*, 2010). Поэтому, в последние годы в мире, активно исследуются принципиально новые сушильные установки с электромагнитными источниками энергии.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ СУШКИ РАЗНООБРАЗНОГО СЫРЬЯ

Основной особенностью электродинамических сушильных аппаратов является их влияние непосредственно на влагу, содержащуюся в материале и практически без потерь на нагрев самого материала. Такой способ энергоподвода имеет высокую эффективность и позволяет быстро (безынерционно) управлять процессом подвода тепла. Комбинированные способы сушки позволяют сочетать преимущества традиционного и инновационного видов и компенсировать отдельные ограничения каждого из них, в результате чего можно получить способ сушки возможно сложный в технической реализации, однако с отличными показателями производительности и/или качества высушенного продукта. Ниже приведен ряд исследовательских работ, посвященных изучению преимуществ и ограничений инновационных и комбинированных способов сушки в

сравнении с классическими методами обезвоживания.

Так, учеными Хуачжунского сельскохозяйственного университета и Ичанской академии сельскохозяйственных наук (Китай, 2019) был проведен целый ряд экспериментальных исследований влияния различных методов процесса сушки на вкусовые качества и химический состав черного чая [17]. На ряду с традиционной конвективной сушкой в работе рассмотрены микроволновой (МВ) подвод энергии, инфракрасная (ИК) сушка, сушка с применением галогеновой лампы (ГЛ) и комбинированный ГЛ-МВ метод. В результате было установлено, что посредством применения МВ технологий черный чай приобретает более равномерный черный цвет, свежий вкус и обладает более сладким ароматом.

В Варминьско-Мазурском университете (Ольштын, Польша, 2018) на примере клюквы была применена гибридная вакуумная МВ сушка с обратным осмосом, принцип которой заключался в последовательном применении обратного осмоса и подвода МВ энергии [18]. В результате были получены образцы с конечным влагосодержанием 15% при начальном 90%.

В 2021 году на базе Университета гуманитарных наук, науки и техники Хунань (Китай) был изучен процесс МВ сушки кукурузы с начальным влагосодержанием 54,6% [19]. Мощность излучения МВ энергии составляла 70 Вт и 280 Вт, температура зерен при этом была на уровне 83°C и 97°C соответственно. В конечном итоге был получен продукт, содержащий всего лишь 13% влаги. Подобные исследования были проведены в 2019 году в Государственном университете Гояса (Бразилия) и Университете Макгилла (Канада) [20].

В 2018 году силами ученых Университетов Сфакса и Монастира (Тунис) изучено совмещенное применение конвективного и МВ методов подвода энергии при сушке томатов [21]. Авторами отмечено, что применение электромагнитного излучения при обезвоживании помидор способствует лучшему сохранению цвета и антиоксидантов.

Сравнительный анализ конвективного и МВ процессов сушки, а также их

комбинирования был проведен в 2019 году научным сообществом Университета в Цзяннане (Китай), Исследовательского института в Нанкине (Китай) и Университета в Бенине [22]. В качестве продукта выступили слайсы клубней таро — популярное пищевое растение Африки, Юго-Восточной Азии и других тропических регионов. В ходе проведения последовательного применения конвективной и МВ сушки с разными мощностями излучения средняя температура слайсов варьировалась в пределах 57—73°C, однако имели место быть и локальные перегревы вплоть до 90°C, несмотря на наличие системы вакуумирования. Но несмотря на это, все же было отмечено, что использование МВ технологий в процессе сушки дает возможность получить готовый продукт более высокого качества наряду с классическими технологиями обезвоживания.

Аналогичные исследования были проведены в Университетах Игдыра и Бурсы (Турция, 2019) [23], а также Газиантепском университете [24]. В работе [23] сырьем выступает помело с начальным влагосодержанием 86,8%. Эксперименты проводились при атмосферном давлении, температура теплоносителя изменялась в пределах 55—75°C, мощность электромагнитного поля составляла 90 Вт и 160 Вт. В выводах также отмечается ряд преимуществ МВ сушки, которые заключаются в сокращении времени процесса, высоких скоростях сушки и качестве готового продукта. В исследованиях [24] подобные манипуляции проводились с ягодами вишни. Совмещенный конвективно-МВ метод проводился при температурах сушильного агента 50—70°C со скоростью 0,5 м/с и при мощности МВ поля 120—180 Вт. Влагосодержание вишни было снижено с 80,75% до 25%.

Достаточно интересные результаты были получены в 2020 году учеными Университета Мохаве Ардабили (Иран) и Автономного университета Герреро (Мексика) при сушке плодов терпентинного дерева различными технологиями, среди которых ИК и МВ методы [25]. В результате было отмечено, что сушка микроволнами характеризуется наименьшим сжиманием плодов, низкими удельными затратами энергии и высокой энергоэффективностью.

В период с 2016 по 2020 годы мировые продажи сушеных овощей и фруктов выросли с 7,94 млн. тонн до 8,73 млн. тонн [26]. Это производство в большей части базируется на установках конвективной сушки. Использование в сушильной промышленности самых современных микроволновых и комбинированных ИК–МВ технологий и оборудования позволило бы значительно уменьшить энергетические затраты на производство перейдя из топлива для создания топочных газов на электроэнергию, которая пойдет непосредственно на нагрев продукта, а не смежных энергоносителей.

Инновационные аппараты электродинамического типа для обезвоживания сырья существенно отличаются от традиционных конвективных по механизмам удаления влаги. Поэтому, авторы этой статьи используют более общий термин дегидратация. Общепринятая теория электродинамических дегидраторов отсутствует.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕГИДРАТАЦИИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ И ФОРМУЛИРОВКА НАУЧНОЙ ГИПОТЕЗЫ

Несмотря на то, что теоретические основы процессов сушки складывались в мире на протяжении 250 лет, и широко представлены в литературе [2—16] (Бурдо О.Г., *Эволюция сушильных установок*, 2010), до сих пор по большинству задач сушки инженерные методы расчета отсутствуют. Это объясняется тем, что сушка является одним из наиболее сложных этапов термообработки – в ее процессе меняется агрегатное состояние воды в объекте, изменяются свойства самого продукта, а, в большинстве случаев, и его форма.

Внешние воздействия различной физической природы (энергетические, концентрационные, гидродинамические, электромагнитные и т.п.) формируют в продукте поля температур (t), давлений (P), влагосодержаний (U). Комбинированное влияние соответствующих движущих сил определяет развитие гидродинамических, тепловых и массообменных процессов. В результате формируется, поток влаги из объема пористого материала [2]:

$$j = -(D\rho_c \nabla U + D\delta\rho_c \nabla t + K_P \nabla P) \quad (1)$$

где ∇U , ∇t , ∇P — градиенты, соответственно, влагосодержания, температуры и давления; δ — относительный коэффициент термодиффузии; K_P — коэффициент фильтрационного (молярного) переноса.

На основе (1) предложена [2] система дифференциальных уравнений, устанавливающих с помощью феноменологических коэффициентов K_{ij} нестационарные поля влагосодержания, температур и давлений. Система справедлива для любого вида влаготеплопереноса, но имеет очень серьезное ограничение: феноменологические коэффициенты K_{ij} должны быть постоянными. При этом, до сих пор никаких общепринятых рекомендаций по их инженерному расчету нет.

Современные представления механизма обезвоживания при сушке базируются на научных основах тепломассопереноса при фазовых переходах [2—16] (Бурдо О.Г., *Эволюция сушильных установок*, 2010) и на теории П.А. Ребиндера о формах связи влаги с коллоидными и капиллярно-пористыми материалами [4].

Усилия большинства ученых в области сушки были направлены на экспериментальное моделирование процессов, разработке методов расчета кинетики сушки. Определилась тенденция все большего ограничения в моделях видов объектов и продуктов. Оправданием являлось повышение точности модели. Наконец, стали использовать регрессионные модели, описывающие массивы экспериментальных данных. Точность таких моделей определялась погрешностями экспериментальных данных, возможностями математического аппарата и оказывалась вполне приемлемой для инженерных задач. Однако эти модели справедливы только для условий опытов и для исследованного объекта, т.е. не распространяются на класс подобных задач, не могут быть использованы для корректной постановки задач прогнозирования и оптимизации даже исследованного аппарата. Правомочен вопрос о целесообразности построения регрессионных моделей.

Таким образом, теория сушки не может эффективно использовать огромный по

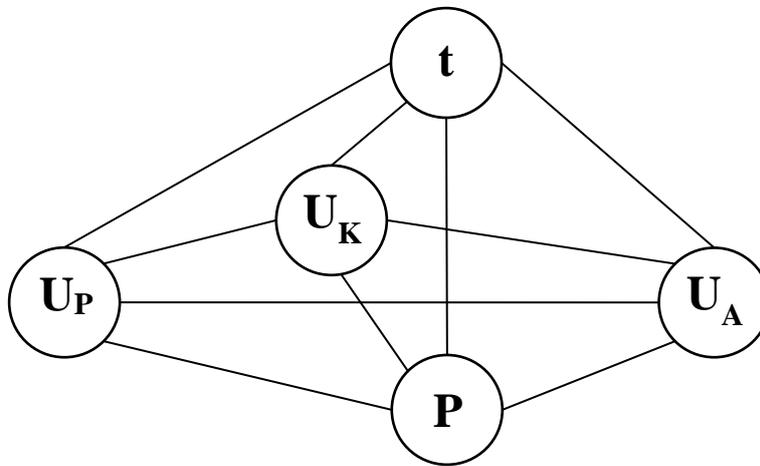
объему экспериментальный материал. Общие модели не точны, а точные регрессионные модели не могут дать никакой новой информации.

Представляется, что возникшие при описании процесса сушки проблемы объясняются тем, что все авторы, сторонники феноменологического подхода, рассматривают сушку как некий один процесс с постоянными коэффициентами переноса и формируют модели из этих предположений.

Проведенный выше анализ свидетельствует, что существует определенная несогласованность между физической моделью П.А. Ребиндера и

математической моделью А.В. Лыкова. В данной работе выдвигается гипотеза, что сушка — это результат действия, на принципе суперпозиции, ряда процессов. Первый — удаление поверхностной влаги, второй — капиллярной, а третий — влаги, связанной силами адсорбции.

У всех этих процессов разные значения, как движущей силы, так и кинетических коэффициентов скорости процесса. При этом, в пределах своего процесса эти параметры могут приниматься одинаковыми. На основе принципов теории графов выдвинутую гипотезу можно выразить в виде схемы (Рис. 1).



(*t* — поле температур / temperature field, *P* — поле давлений / pressure field, *U_р* — поверхностная влага / surface moisture, *U_к* — влага в капиллярах / capillary moisture, *U_а* — адсорбционно связанная влага / adsorption bonded moisture)

Рис. 1. Граф предлагаемой схемы тепловлагодпереноса при сушке. / Fig. 1. Graph of the proposed heat and moisture transfer scheme during drying.

Каждый из трех процессов подчиняется своим законам переноса и реализуется за счет разных механизмов.

Рассмотрим эти особенности (таблица 1). Таким образом, модель сушки должна учитывать распределение во времени поверхностной влаги (*U_р*), влаги в

капиллярах (*U_к*) и адсорбционно связанной влаги (*U_а*). При такой постановке усложняются как граф тепловлагодпереноса, так и система уравнений А.В. Лыкова [2]. Соответствует выдвигаемой гипотезе (Рис. 1) и предлагаемая система 2.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_P}{\partial \tau} &= K_{11} \nabla^2 U_P + K_{12} \nabla^2 U_K + K_{13} \nabla^2 U_A + K_{14} \nabla^2 t + K_{15} \nabla^2 P \\ \frac{\partial U_K}{\partial \tau} &= K_{21} \nabla^2 U_P + K_{22} \nabla^2 U_K + K_{23} \nabla^2 U_A + K_{24} \nabla^2 t + K_{25} \nabla^2 P \\ \frac{\partial U_A}{\partial \tau} &= K_{31} \nabla^2 U_P + K_{32} \nabla^2 U_K + K_{33} \nabla^2 U_A + K_{34} \nabla^2 t + K_{35} \nabla^2 P \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} &= K_{41} \nabla^2 U_P + K_{42} \nabla^2 U_K + K_{43} \nabla^2 U_A + K_{44} \nabla^2 t + K_{45} \nabla^2 P \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} &= K_{51} \nabla^2 U_P + K_{52} \nabla^2 U_K + K_{53} \nabla^2 U_A + K_{54} \nabla^2 t + K_{55} \nabla^2 P \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В соответствии с моделью (2) уточняем отдельные процессы (Таблица 1).

Таблица 1 / Table 1.

Сравнение методов деминерализации / Comparison of demineralization methods.

№	Процесс / Process	Механизм процесса / Process mechanism	Движущая сила процесса / Process driving force	Кинетический коэффициент / Kinetic coefficient
1	Испарение влаги с поверхности / Moisture evaporation from the surface	Конвективная диффузия / Convective diffusion	$a_K P_{II} - P_B$	β_K
2	Испарение влаги внутри капилляров, пор / Moisture evaporation inside the capillaries, pores	Конвективная диффузия в стесненных условиях / Convective diffusion in constrained conditions	$a_C P_{II} - P_B$	β_C
3	Десорбция влаги / Moisture desorption	Конвективная диффузия / Convective diffusion	$a_D P_{II} - P_B$	β_D

Выдвинутая гипотеза не противоречит фундаментальным представлениям физики влажного капиллярно-пористого тела и общепризнанной схеме П.А. Ребиндера форм связи влаги [4]. Удаление влаги разных форм связи — это разные процессы со своими коэффициентами переноса, со своим потенциалом, движущей силой (табл. 1). Попытка коррекции движущей силы с помощью показателя активности воды a_i известна в мировой практике [27].

Расчет коэффициентов массоотдачи β проводится на основе уравнений в обобщенных переменных, как зависимость числа Шервуда от чисел Рейнольдса и Шмидта: $Sh = A \times Re^n \times Sc^m$.

Константы в уравнениях определяются при обработке массивов экспериментальных данных. Представляется, что имеющихся в литературе данных достаточно для обобщений многих процессов.

При сушке дисперсного материала перспективным может стать обобщение в виде соотношения массообменных чисел Стантона и Пекле:

$$St_m = \frac{\beta}{w} = A \times Pe_m^k \quad (3)$$

Числа Шервуда и Стантона представляют собой две различные безразмерные формы коэффициента массоотдачи. Каждые из этих

форм имеют свои преимущества [28]. Число Шервуда не содержит режимных параметров, но в его состав входят характерный размер системы и коэффициент диффузии. Поэтому такое обобщение результатов исследования имеет преимущества при изучении влияния геометрических размеров системы и физических свойств среды.

Число Стантона непосредственно связано с диффузионным сопротивлением, оно не зависит от представления о пристенном пограничном слое как области действия молекулярного механизма массопереноса. Вывод числа Шервуда основан именно на анализе такого пристенного слоя.

Проведенный выше анализ схемы массопереноса показывает, что значение β определяется инерцией потока (массоперенос в условиях свободного движения отсутствует), геометрические параметры аппарата не могут непосредственно влиять на интенсивность массоотдачи.

В этих условиях скорость потока может быть принята в качестве характеристического значения коэффициента массоотдачи, и служить для него масштабом отнесения.

Во всех случаях константы критериальных соотношений следует определить экспериментально. Однако, в условиях электромагнитного поля критериальная модель (3) требует учета действия электродинамических источников энергии.

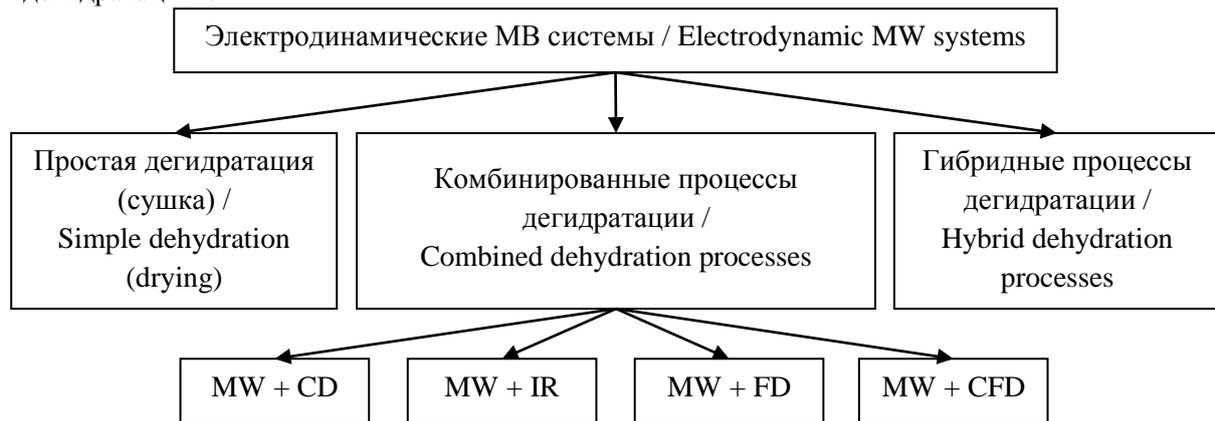
**ИННОВАТИКА СИСТЕМ С
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ
ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ В
ТЕХНОЛОГИЯХ ДЕГИДРАТАЦИИ**

Комплексные исследования систем обезвоживания с использованием электродинамических микроволновых источников энергии (Burdo O.G., *J Eng Phys Thermophy*, 2005; Burdo O.G. et al, *Problemele energeticii regionale*, 2020; Burdo O.G. et al, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018; Burdo O.G. et al, *EasternEuropean J. Enterp. Technol.*, 2017; Burdo O.G. et al, *Problemele energeticii regionale*, 2021), проведенные авторами, дают основания полагать, что справедливы 2 вывода.

1. Процессы обезвоживания в электромагнитных полях, как правило, не отвечают представлениям классической «сушки». Это более общие и разнообразные процессы, которые корректнее называть «дегидратация».

2. Возможна классификация процессов дегидратации в электромагнитном микроволновом поле по движущим силам.

Предложенная классификация (Рис. 2) определяет условия, когда осуществляется обычная диссипация электромагнитной энергии в теплоту, без дополнительных эффектов и движущих сил. Это простая дегидратация, которую можно рассматривать как сушку. Далее рассматриваются комбинированные процессы, когда объединяются положительные возможности конвективной сушки (CD), инфракрасного поля (IR), фильтрационной сушки (FD), центробежной сушки (CFD). Режимы комбинированных способов дегидратации оптимизируются по минимуму энергетических затрат, по параметрам выхода целевых компонентов и т.п.



(MW — микроволновая сушка / microwave drying, CD — конвективная сушка / convective drying, IR — инфракрасная сушка / infrared drying, FD — фильтрационная сушка / filtration drying, CFD — центробежная сушка / centrifugal drying)

Рис. 2. Классификация процессов дегидратации в электродинамических системах. / Fig. 2. Classification of dehydration processes in the electrodynamic systems.

Третья группа процессов объединяется тем, что электродинамические системы используются как стартовые для инициирования гибридного процесса, который характеризуется более мощными движущими силами переноса — механическими.

Исходя из общих закономерностей кинетики массопереноса, комбинация различных принципов обезвоживания будет эффективной, если в результате повысится значения величины движущей силы или коэффициента переноса. Важным критерием

является, также, и энергетика процесса, величина удельных затрат энергии на удаление влаги. В этой связи, особый интерес представляют способы механического обезвоживания.

Представляется возможным механическое удаление влаги с поверхности сырья при ее доставке к поверхности бародиффузионным механизмом (Burdo O.G. et al, *Problemele energeticii regionale*, 2020), который иницируется действием импульсного электромагнитного поля (IEF). В этой связи необходимо, во-первых, снять с воздуха

задачи теплоносителя, а оставить только задачу «приемника» влаги. Во-вторых, организовать обезвоживание продукта с минимальным выпариванием из него влаги, т.е. подключить бародиффузионные процессы. В-третьих, использовать механическое удаление влаги с поверхности продукта за счет продувки его воздухом из окружающей среды. В-четвертых, организовать бародиффузию из объема продукта с помощью IEF. Схема такого способа сушки иллюстрируется рис. 3.

По такой схеме удаление влаги будет происходить методами фильтрационной сушки, а подвод энергии — волновыми технологиями. Такой комбинированный

способ имеет ряд существенных преимуществ. Во-первых, в традиционных подходах градиент влагосодержаний направлен в глубину продукта, а температуры — к поверхности. При IEF градиент температуры направлен в середину продукта. Именно этот факт позволяет инициировать бародиффузионный поток влаги к поверхности. Во-вторых, на нагрев сухой части продукта тратится меньшее количество энергии. А это — предпосылки энергетической эффективности IEF способа обезвоживания сырья. Рассмотрим комбинированные процессы дегидратации (Рис. 3).

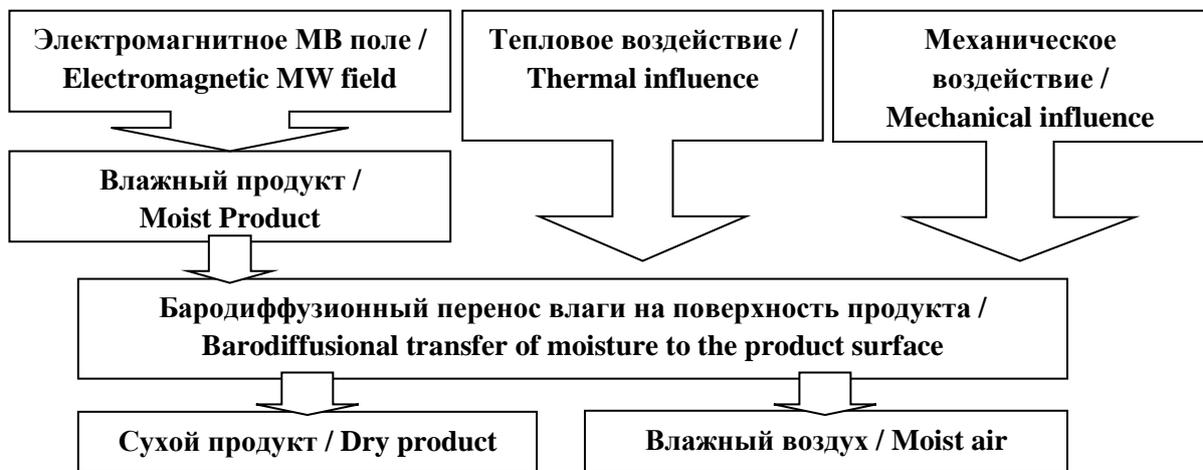
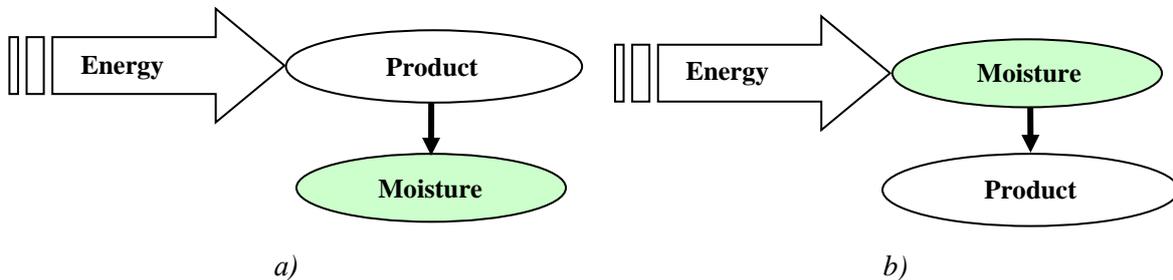


Рис. 3. Схема комбинированных процессов дегидратации. / Fig. 3. Scheme of combined dehydration processes.

Сухая часть продукта для большинства растительного сырья является радиопрозрачной. Механизм IEF сушки состоит в том, что электромагнитное излучение определенной длины волны

активно поглощается водой в продукте, поэтому непосредственно от этих лучей сухая часть продукта не нагревается. Рассмотренный механизм поясняется схемой (Рис. 4).



(a — традиционная конвективная сушка / traditional convective drying, b — дегидратация в импульсном электромагнитном поле / Impulse Electromagnetic Field (IEF) dehydration)

Рис. 4. Схемы подвода энергии. / Fig. 4. Energy supply schemes.

Естественно, вода, нагреваясь, отдает некоторую часть тепловой энергии сухой части продукта, но это значительно меньше, чем при конвективной сушке.

Рассмотрим принципы гибридных процессов (Рис. 5).

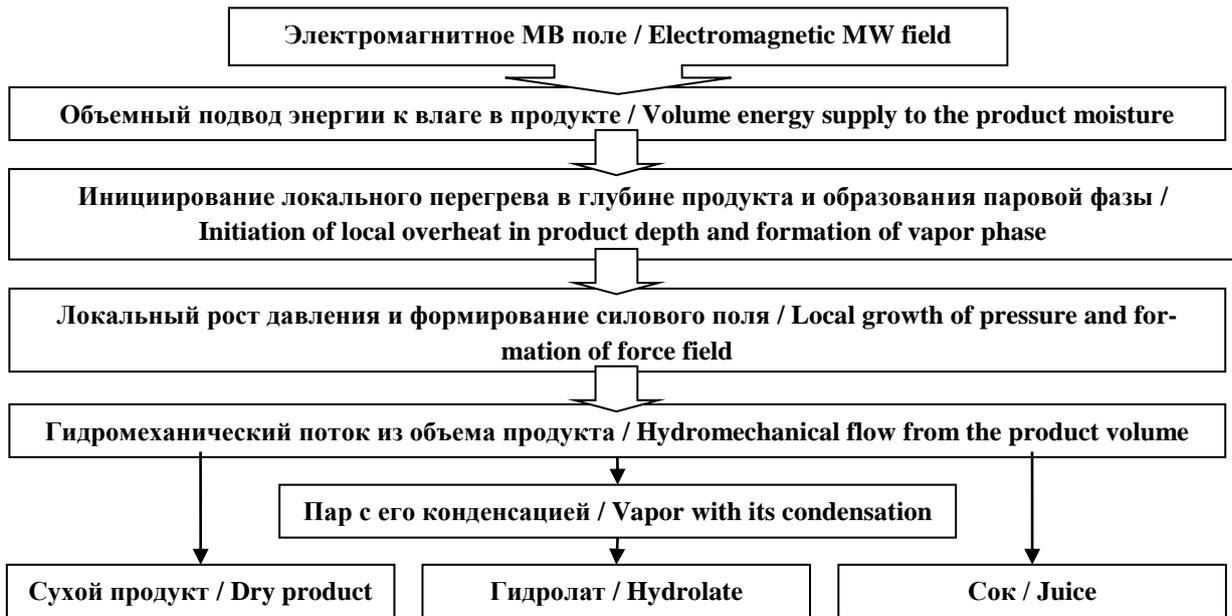
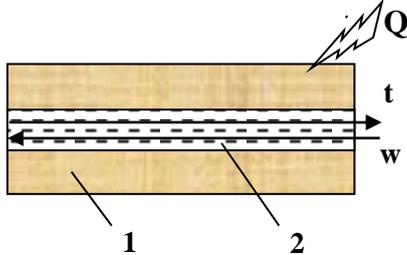


Рис. 5. Концептуальная модель гибридного процесса. / Fig. 5. Conceptual model of hybrid process.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ И ГИБРИДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЕГИДРАТАЦИИ

Техническая идея способа ИЕФ дегидратации основывается на специфичном характере градиентов температур и влагосодержаний в продукте (1) при объемном, электромагнитном подводе энергии (Рис. 6). При определенных условиях, согласовании режимных

характеристик электродинамических систем и физических параметров сырья в термодинамической системе «влажный продукт — электромагнитное поле» возможно совершение работы. В комбинированных процессах дегидратации работа затрачивается на транспортировку влаги из объема сырья по каналу 2 к его поверхности. В гибридных — на выброс влаги по каналу 2 за объемы сырья.

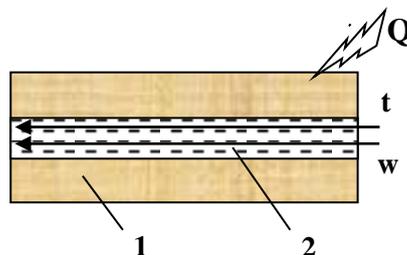


$$Q = \Delta U_T + A_T \tag{4}$$

$$\Delta U_T = V \times \rho \times (i_K - i_H) \tag{5}$$

$$A_T = 0$$

a)



$$Q = \Delta U_I + A_I \tag{6}$$

$$Q = \eta \times N_E \tag{7}$$

$$\Delta U_I = V \times \rho \times (i_K - i_H) \tag{8}$$

$$A_I = F \times L = \frac{\Delta P}{S} \times L \tag{9}$$

$$\Delta P = \frac{\rho w^2}{2} \times \left[\frac{\lambda l}{d} + \sum \xi \right] + \rho g l + \frac{\sigma}{d} \tag{10}$$

b)

Рис. 6. Градиенты температур (t) и влагосодержаний (w) при традиционной сушке (a) и комбинированной микроволновой дегидратации (b). / Fig. 6. Temperature (t) and moisture contents (w) gradients during traditional drying (a) and combined microwave dehydration (b).

По первому закону термодинамики в традиционной сушке (Рис. 6а) затрачиваемая теплота Q трансформируется полностью на повышение внутренней энергии продукта ΔU_T , т.е. на повышение энтальпии ($i_K - i_H$), а работа в системе равна 0 (4, 5). При использовании магнетронов, мощность которых N_E и КПД η (соотношение 7), совершается работа A_T . Образование паровой фазы в глубине канала 2 (Рис. 6б) приводит к росту давления на ΔP , что, с учетом сечения канала S , определяет силу F , которая перемещает жидкость на путь L (9).

Результирующая сила F определит скорость потока жидкости. С учетом сил поверхностного натяжения, что характерно для микрокапилляров, связь разности давлений в капилляре (ΔP) определяется скоростью движения жидкости (w), ее плотностью (ρ), суммой местных сопротивлений (ξ), силами поверхностного натяжения (σ). Произведение ΔP на величину перемещаемого объема жидкости (V) даст необходимую для реализации процесса энергию (\mathcal{E}). Это количество энергии, которое необходимо при механическом воздействии на жидкость в капилляре, т.е. для процесса ее перемещения в канале 2.

Величина ΔP определяется мощностью электромагнитного поля (МВ) и электрофизическими параметрами содержимого капилляра. Именно мощностью МВ поля можно управлять этим потоком. Если принять, что в объеме твердой фазы равномерно распределены источники энергии, мощность которых $N\eta$, то соответствующее уравнение энергии в цилиндрических координатах примет вид:

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_1 c_{IV} \rho_1} \quad (11)$$

Подведенная в процессе энергия ($N\eta\tau$) расходуется на повышение внутренней энергии жидкости и на ее перемещение в объеме твердой фазы.

В соотношении (11): t — температура; τ — время; a — коэффициент температуропроводности; c — удельная

теплоемкость; N — мощность магнетрона; η — КПД магнетрона; ρ — плотность; V — объем; z, r, ϕ — координаты; индекс I — жидкость.

Уровень роста давления (ΔP) определяется основным уравнением гидравлики (10) дополненным капиллярным потенциалом канала (Burdo O.G. et al, *Problemele energeticii regionale*, 2020).

Механизм взаимодействия микроволнового поля с влажным капиллярно-пористым продуктом, процессы комбинированного нано- и макропереноса влаги из волокнистой структуры в воздух впервые рассмотрены в работе авторов (Burdo O.G., *J Eng Phys Thermophy*, 2005). Механизм подтвержден опытами обезвоживания влажных пищевых отходов (Burdo O.G. et al, *Problemele energeticii regionale*, 2020), зерновых продуктов (Burdo O.G. et al, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018; Burdo O.G. et al, *Eastern European J. Enterp. Technol.*, 2017), некоторых фруктов и овощей (Burdo O.G. et al, *Problemele energeticii regionale*, 2021). В работах на основе электродиффузионной модели рассматривается последовательная цепочка диффузионных сопротивлений, которая состоит из суммы: $\sum R = R_{HK} + R_{MK} + R_{MO}$.

Процесс конвективной массоотдачи от поверхности продукта в поток воздуха имеет наименьшее диффузионное сопротивление (R_{MO}). Влага перемещается по микрокапиллярам к поверхности продукта, преодолевая диффузионное сопротивление (R_{MK}). Это конвективная диффузия в стесненных условиях (поток j_1). Диффузионное сопротивление нанокapилляров обозначено (R_{HK}). Это наибольшее диффузионное сопротивление, поскольку стесненность диффузионных процессов в нанокapиллярах максимальна.

При воздействии импульсного электромагнитного поля инициируется поток влаги из капилляров (j_2). По сути, это гидравлический поток, который определяется растущим в капиллярах давлением P_K (Рис. 5). Отдельные капилляры, где достигнуты условия для генерации паровой фазы, начинают периодически выбрасывать в воздух жидкость из капилляров.

Влага из нанокапилляров выбрасывается в микрокапилляры преодолевая соответствующее сопротивление. Частота таких выбросов и число функционирующих капилляров растет с ростом N — мощности излучения.

В связи с серьезными трудностями, возникшими в результате аналитического моделирования, следует применить экспериментальное моделирование, основной научной базой которого является теория подобия и метод «анализа размерностей».

При постановке задачи и приведении краевой задачи к модели в обобщенных переменных предлагается аналогия с центрами парообразования. Суммарный поток (j) определяется коэффициентом массопередачи (K) традиционной схемы и коэффициентом массоотдачи (β_P) бародиффузионного (механического) потока:

$$j_1 = j_2 + j_3 = K \times (C_{II} - C_B) + \beta_P \times (P_K - P_B) \quad (12)$$

Этот поток турбулизирует и пограничный слой. Сопротивление массопереносу бародиффузией может быть на несколько порядков ниже, чем в традиционных схемах массоотдачи. Таким образом, гидродинамическая ситуация в потоке определяется эквивалентным диаметром (d), относительной скоростью движения диффузионной среды (w). Процесс переноса осложнен вихревой диффузией из каналов твердой фазы, импульсным характером поля, которое определяет число и производительность центров точечного массопереноса.

Задачи такого плана решаются методами экспериментального моделирования. Методом «анализа размерностей» определена структура уравнения в безразмерных переменных. Предложено (Burdo O.G., *J Eng Phys Thermophy*, 2005) новое число, число энергетического воздействия:

$Bu = N / (r \times w \times d^2 \times \rho)$ для учета влияния действия IEF. Физический смысл числа Bu заключается в том, что устанавливается соотношение между энергией излучения и той энергией, которая необходима для преобразования в пар всей воды, которая находится в продукте. В соотношении (r —

теплота фазового перехода, а ρ — плотность воды).

Чем ближе число Bu к 1, тем больше образовывается паровой фазы, тем больше градиент давлений, тем интенсивнее выбросы влажного насыщенного пара из глубины капилляров. Растет турбулизация пограничного слоя, но увеличиваются нагрев твердой фазы и расход энергии. Число Bu характеризует микро- и нанокинетику массопереноса бародиффузией (Burdo O.G. et al, *Problemele energeticii regionale*, 2020; Burdo O.G. et al, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018; Burdo O.G. et al, *Eastern European J. Enterp. Technol.*, 2017; Burdo O.G. et al, *Problemele energeticii regionale*, 2021). Структура уравнения в безразмерных переменных в общем виде в условиях неподвижного слоя сырья и потока диффузионной среды записывается так:

$$Sh = A \times Re^n \times Sc^m \times Bu^k \quad (13)$$

Для аппаратов, в которых слой дисперсного продукта перемешивается, этот фактор интенсификации учитывается числом Пекле:

$$Sh = A \times Re^n \times Sc^m \times Bu^k \times Pe^p \quad (14)$$

Константы в соотношениях (13) и (14) определяются в результате экспериментального моделирования процессов обезвоживания.

Экспериментальное моделирование процессов дегидратации в электромагнитных полях проводилось на универсальном стенде (Рис. 7). Основными элементами стенда являлись: герметичная, радиопрозрачная рабочая камера 1, конденсатор 2, холодильная машина 3, сборник конденсата (гидролата) 4, установленный на весах 5, система сбора и обработки экспериментальных данных 6, сборник жидкой фракции 7, установленный на весах 8, микроволновой генератор энергии 9 и инфракрасный генератор энергии 10. В камере 1 на перфорированной полке 11 размещается влажный продукт 12. Камера 1 сообщается с объемом конденсатора паропроводом 13. Перед запуском установки рабочее давление устанавливается вакуум-насосом 14 и контролируется мановакуумметром 15.

В процессе эксперимента давление в камере стабилизируется путем согласования мощностей электродинамической и холодильной систем. Следовательно, весь полученный пар полностью конденсируется. Кроме того, в паропроводе 13 улавливаются ароматические компоненты, которые в традиционных сушилках выбрасываются в атмосферу.

Измерительная база станда: электронные весы (5 и 8) типа TBE-0,21-0,01, датчики температур D3 и D4 типа Dallas DS18B20, энергометр Feron TM55, образцовым вакуумметром класса точности 0,4. Информация поступала на планшет CHUWI CW1506. На экране дисплея отображались термограммы, количество удаленного сока и гидrolата из камеры и мгновенные значения скорости этих потоков (грамм в минуту).

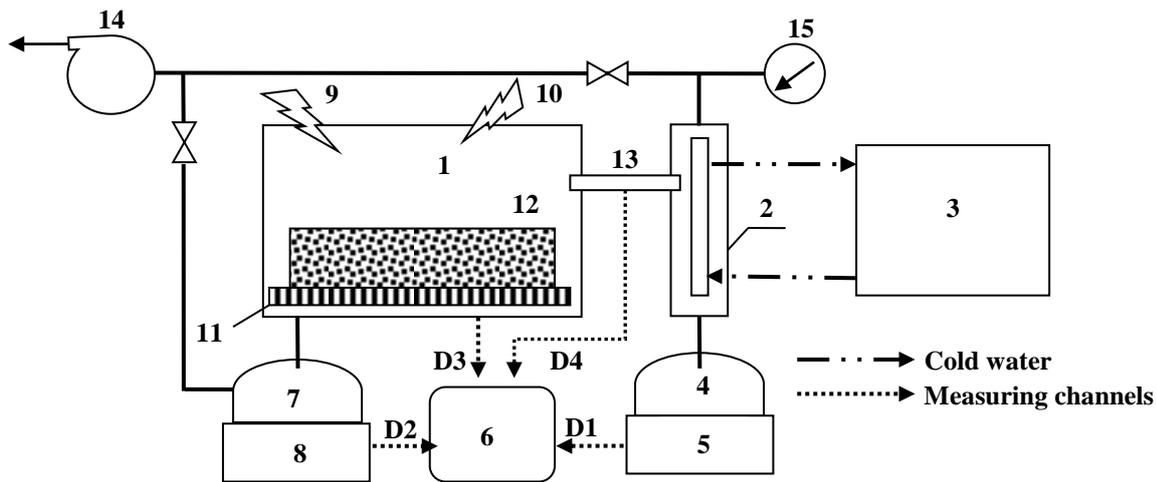


Рис. 7. Схема универсального станда для исследования процессов дегидратации в электромагнитных полях. /

Fig. 7. Scheme of universal stand for dehydration processes in the electromagnetic field study.

При исследовании комбинированного процесса дегидратации с привлечением приемов фильтрационной сушки (Рис. 3) кассета из радиопрозрачного материала помещалась в резонаторную камеру, где осуществлялось воздействие на продукт микроволновым полем. В качестве продукта исследовался горох. Фиксировалось время обработки, режим IEF, температуры и вес продукта до и после обработки. Затем кассета подключалась к компрессору и проводилась продувка продукта воздухом. Измерялись температуры и вес кассеты с продуктом до и после продувки. В опытах изменялись время IEF воздействия и продувки. Результаты опытов свидетельствуют, что с уменьшением времени воздействия как при подводе энергии, так и при продувке сокращается время процесса обезвоживания и, что

наиболее интересно, удельные затраты энергии.

Представляется, что минимизация энергопотребления связана с реализацией следующих принципов:

- за счет объемного подвода энергии доставить влагу на поверхность продукта практически без изменения общего влагосодержания, при минимальном нагреве продукта;
- в режиме фильтрационного обезвоживания провести механический отвод влаги с поверхности при минимальном снижении температуры поверхности продукта.

Исходя из этих положений поставлен следующий эксперимент, в котором продувка проводилась импульсно, в течение 10 секунд (Рис. 8).

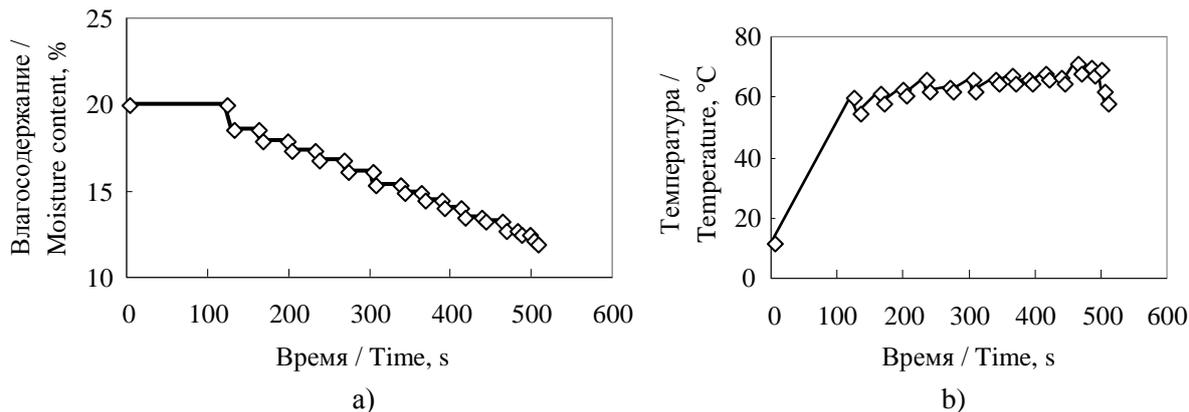


Рис. 8. Линия дегидратации (а) и термограмма (b) комбинированного процесса. / Fig. 8. Dehydration line (a) and thermogram (b) of combined process.

Уровень энергетических затрат (Рис. 8) показывает, что удаление влаги проходит в виде пара и в виде тумана. Анализ результатов опытов позволяет сделать вывод, что удельные затраты энергии связаны с

диапазоном изменения температур, особенно в режиме продувки (фильтрационной сушки) продукта. И, действительно, такая корреляция обнаружена (Рис. 9).

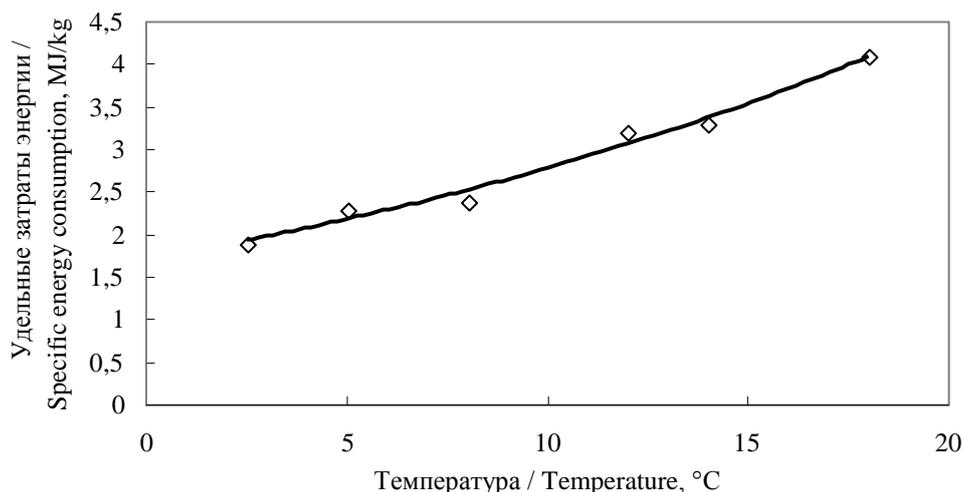


Рис. 9. Зависимость удельных затрат энергии от степени охлаждения продукта. / Fig. 9. Dependence of specific energy consumption on the product cooling level.

Из анализа рис. 9 можно сделать два вывода:

- существует четкая зависимость между величиной изменения температуры при продувке продукта и значением удельных затрат энергии на удаление влаги из продукта;
- достигнутый в опытах уровень энергетических затрат ниже удельной теплоты фазового перехода для воды.

Второй вывод убедительно подтверждает выдвинутую гипотезу о возможности в условиях IEF обезвоживания без обязательного полного парообразования.

Проведены исследования гибридных процессов дегидратации (Рис. 6). Техническая идея конструкции — использовать специфику образования паровой фазы в капиллярах продукта для организации пародинамического эффекта, для совершения работы по перемещению влаги из продукта (фактически сока) за пределы камеры без ее испарения (Рис. 10). Для этого в конструкции (Рис. 7) предусмотрена фильтрующая полка 11, через которую сок поступает в сборник 8.

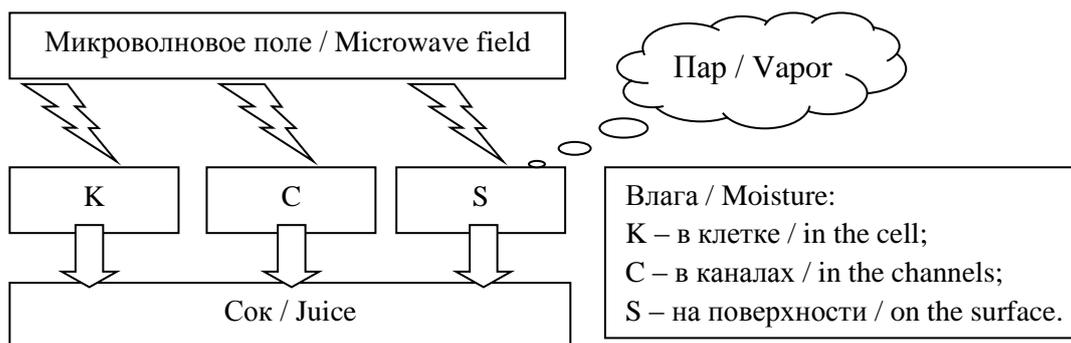


Рис. 10. Схема потоков энергии и влаги в гибридных процессах дегидратации. / Fig. 10. Scheme of energy and moisture flows in the hybrid dehydration processes.

В опытах изменялась мощность магнетрона, объем раствора, его концентрация. Пар по трубке 13 (Рис. 7) выходил из реактора и направлялся в конденсатор, из которого собирался в емкости, установленной на весах. Весы (Рис. 7) регистрировали вес конденсата в сборнике (СК). Таким образом, с высокой точностью определялся расход пара. Компьютеризация стенда позволяла регистрировать текущие значения расхода пара, интенсивности процесса удаления влаги и термограммы. Информация обрабатывалась и строились соответствующие графические зависимости.

В дальнейшем пар отдает свою энергию холодной воде в конденсаторе, образовавшаяся жидкость насыщается

ароматическими летучими компонентами и отводится из установки.

Таким образом, организуются следующие этапы: «объемный подвод энергии к продукту — формирование паровой и жидкой фракций — отвод жидкости и конденсация пара — получение сухого продукта, сока и гидролата».

При экспериментальных исследованиях ставились задачи определить влияние мощности МВ поля, давления, вида продукта, уровня загрузки камеры на кинетику выхода сока и гидролата. Объектами исследований были высоковлажные пищевые продукты: арбуз и банан. Результаты влияния мощности МВ поля на процесс дегидратации арбуза приведен на рис. 11.

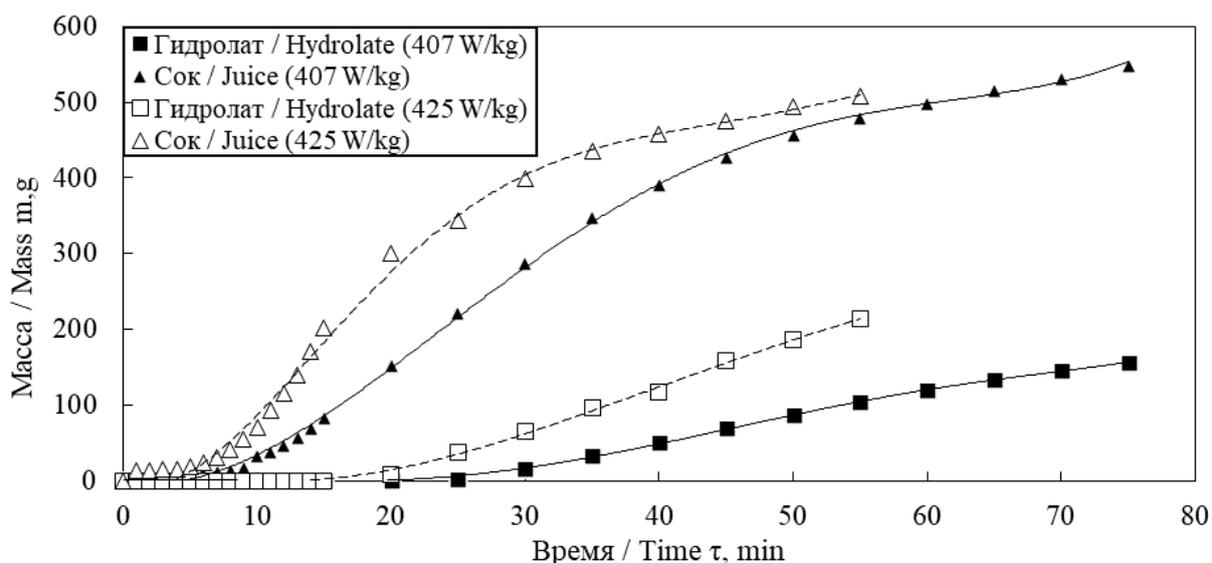


Рис. 11. Кинетика выхода сока и гидролата из арбуза. / Fig. 11. Kinetics of juice and hydrolate yield from watermelon.

Данные (Рис. 11) получены при следующих условиях: давление в камере — атмосферное, температурный диапазон от 18

до 96°C. Анализ результатов опытов позволяет сделать ряд выводов.

1. Выход сока из арбуза зафиксирован на 8 минуте (Рис. 11). Температура поверхности продукта в этот момент времени достигла только 50°C. Следовательно, температура образования паровой фазы достигалась в глубине арбуза уже на 8 минуте.
2. При удельной мощности МВ поля 407 Вт на 1 кг сырья выход сока превышал выход сконденсированного пара (гидролата) в 3,5 раза. Это доказывает сформулированную гипотезу «пародинамического эффекта».
3. Повышение удельной мощности МВ поля до 425 Вт на 1 кг сырья привело к росту выхода сока и гидролата на 24%. При этом, выход гидролата вырос на 107%, а сока только на 6% по сравнению с прошлым опытом. Это свидетельствует о том, что мощность МВ поля является фактором управления процессом дегидратации и фактором его оптимизации. существенном снижении энергетических затрат в предложенном методе обезвоживания.
4. Организация процесса обезвоживания пищевого сырья в режиме

пародинамического эффекта позволяет повысить качество готового продукта, сохранить его структуру при снижении затрат энергии на процесс дегидратации.

Выполнен комплекс стендовых испытаний экспериментального образца камерной установки для дегидратации овощей и фруктов при атмосферном давлении. Установка использует электромагнитные источники энергии микроволнового и инфракрасного диапазонов. Кассеты с продуктом подвешены к цифровым весам, которые фиксируют убыль жидкой фазы. Температуры продукта и воздуха в камере при использовании ИК генераторов измеряются термопарами. В условиях МВ температуры регистрируются тепловизором Flir TG167. В качестве пищевого сырья исследовались различные овощи и фрукты, подготовленные в виде слайсов, кубиков и соломки. Ниже (Рис. 12) приведены результаты сравнения влияния вида электромагнитного поля на процесс дегидратации слайсов моркови, яблок и лука. В опытах соблюдалась одинаковая форма и размеры сырья, толщина слоя, мощность электромагнитного поля.

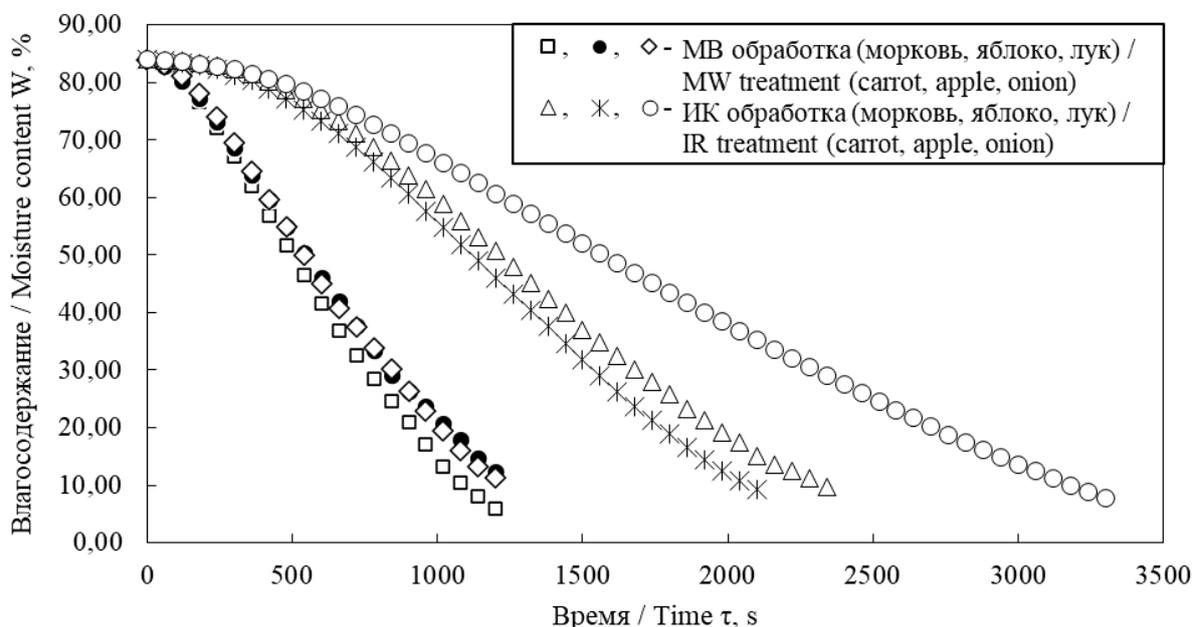


Рис. 12. Кинетика сушки продуктов в камерной сушилке с ИК и МВ генераторами. / Fig. 12. Kinetics of products drying in the drying chamber with IR and MW generators.

Установлено, что процесс дегидратации в МВ поле мало зависит от вида сырья и отличается существенной интенсивностью. Для оценки этого фактора определена

скорость дегидратации, равная отношению расходу удаленной влаги к весу сырья (таблица 2).

Таблица 2 / Table 2.

Влияние вида продукта и электромагнитного поля на интенсивность дегидратации /
Influence of product type and electromagnetic field on the dehydration intensity.

№	Продукт / Product	Скорость дегидратации / Dehydration speed, g/(kg·min)	
		ИК поле / IR field	МВ поле / MW field
1	Лук / Onion	18	48
2	Морковь / Carrot	26	52
3	Яблоко / Apple	29	46

Обработка базы экспериментальных данных проводилась в соответствии с принципами получения модели (13), при отсутствии числа Рейнольдса и добавлением параметрического безразмерного комплекса H , учитывающего высоту слоя сырья. Для режимов в ИК поле вводился еще фактор Ff , учитывающий специфику сырья. В результате обработки для расчета интенсивности дегидратации слайсов в условиях ИК поля предлагается уравнение (15), а МВ поля — (16):

$$Sh = A \times Bu^{1,91} \times H^{-1,28} \times Ff^{-0,0037} \quad (15)$$

$$Sh = 7,1 \times 10^{-6} \times Bu^{7,18} \times H^{0,51} \quad (16)$$

В диапазоне $3,37 \leq Bu \leq 15,02$; $0,003 \leq H \leq 0,01$; $0,0086 \leq Ff \leq 0,42$; $A = 13,6 \times 10^{-12}$ (для яблок); $A = 1,7 \times 10^{-9}$ (для лука); $A = 0,64 \times 10^{-7}$ (для моркови) – для ИК поля, $2,53 \leq Bu \leq 3,06$; $0,003 \leq H \leq 0,01$ – для МВ поля указанные модели с погрешностью не более 16% устанавливают интенсивность массопереноса при дегидратации слайсов овощей и фруктов.

ВЫВОДЫ

Динамика мирового рынка сухих пищевых концентратов стабильно растет. Особый интерес на рынке проявляется к сушеным фруктам и овощам. Так, за последние 4 года рост объема продаж сухофруктов вырос с 7,94 до 8,73 млн. тонн. Традиционно, сушеные продукты производят в аппаратах конвективного типа. Задача интенсификации процесса сушки в конвективных аппаратах решается путем увеличения скорости теплоносителя. Однако, с ростом скорости его движения пропорционально растут потери энергии в окружающую среду. Решение этого противоречия в настоящее время отсутствует.

В работе выдвинута гипотеза, что решение проблемы возможно при переходе на инновационные источники энергии – электромагнитные генераторы инфракрасного и микроволнового диапазона. Аналитические исследования процессов взаимодействия влажного капиллярно-пористого сырья и электромагнитного поля показали, что возможны условия транспортировки части влаги из объема на поверхность сырья, или, даже, в окружающую среду без превращения ее пар. А это предпосылки снижения удельных затрат энергии при дегидратации. Такой эффект назван авторами — пародинамический. Исследованы конструкции инновационных дегидраторов. Простые процессы дегидратации (сушка в электромагнитном поле) способны снизить удельные затраты энергии практически до теоретического уровня, до 3 МДж на 1кг удаленной влаги. В комбинированном процессе дегидратации при обработке сырья в микроволновом поле и дальнейшей фильтрационной продувкой сырья холодным воздухом затрачено 1,9 МДж на 1 кг удаленной влаги. Исследования гибридных процессов показало, что выход сока из сырья зафиксирован уже на 8 минуте. За весь процесс пара (гидролата) вышло в 3,5 раз меньше, чем сока. Установлено, что интенсивностью процесса можно управлять параметрами электромагнитного поля. Электродинамические аппараты имеют существенный резерв по повышению энергетической эффективности. Полученные результаты представляют интерес для совершенствования технологий обезвоживания пищевого и лекарственного растительного сырья.

Литература (References)

- [1] Electronic resource: <https://mppnik.ru/publ/1190-korotko-o-sushke-plodov-i-ovoschey.html> (Accessed 12.08.2022).

- [2] Lykov A.V. *Teplomassoobmen (spravochnik)* [Heat and Mass Transfer (Handbook)]. Moscow: Energiya, 1971. 560p. (In Russian).
- [3] Lykov A.V. *Teoriya Sushki* [Drying Theory]. Moscow: Energiya, 1968. 472p. (In Russian).
- [4] Rebinder P.A. O Formakh Svyazi Vlazi s Materialami v Protsesse Sushki [About the Forms of Moisture Bond with Material During Drying]. *Vsesoyuznoe Nauchno-Tekhnicheskoe Ssoveshchanie po suchke — All-Union Scientific and Technical Conference on Drying*. Moscow: Profizdat, 1958. 286p. (In Russian).
- [5] Lutsyk P.P. Massoprovodnost' Deformiruemogo v Protsesse Sushki Tverdogo Poristogo Tela [Mass Conductivity of Solid Porous Body Deformed During Drying]. *Promyshlennaya Teplo tehnika — Industrial Heat Engineering*, 1987, vol. 9, no. 5, pp. 29-34. (In Russian).
- [6] Dolinskii A.A., Ivanitskii G.K. *Optimizatsiya Protsessov Raspylitel'noj Sushki* [Optimization of Spray Drying Processes]. Kyiv: Naukova dumka, 1984. 240p. (In Russian).
- [7] Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N. Matematicheskaya Model' i Metod Rascheta Teplomassoperenosa i Fazovykh Prevrashchenii v Protsessakh Sushki [Mathematical Model and Calculation Method of Heat and Mass Transfer and Phase Transformations in Drying processes]. *Promyshlennaya Teplo tehnika — Industrial Heat Engineering*, 2001, vol. 23, no. 3, pp. 65-73. (In Russian).
- [8] Snezhkin Yu.F., Boryak L.A., Khavin A.A. *Energoberegayushchie Teplo tehnologii Proizvodstva Pishchtykh Poroshkov iz Vtorichnykh Ssyryevykh Resursov* [Energy-Saving Heat Technologies for the Production of Food Powders from Secondary Raw Materials]. Kyiv: Naukova Dumka, 2004. 228p. (In Russian).
- [9] Potapov V.O., Pogozhykh M.I. Molekulyarno-kinetychnyj Metod Analizu Kinetyky Sushinnykh Kolojidnykh Kapilyarno-Poruvatykh Materialiv [Molecular and Kinetic Analysis Method of Drying Kinetics of Colloidal Capillary and Porous Materials]. *Naukovi Pratsi ONAHT — Scientific Works ONAHT*, 2003, no. 26, pp. 270-274. (In Russian).
- [10] Grishyn M.A., Atanazevich V.I., Semenov Yu.G. *Ustanovki dlya Sushki Pishchevykh Productov: Spravochnik* [Plants for Food Products Drying: Handbook]. Moscow: Agropromizdat, 1989. 215p. (In Russian).
- [11] Planovskii A.N., Mushtaev V.I., Ul'yanov V.M. *Sushka Dispersnykh Materialov v Khimicheskoy Promyshlennosti* [Drying of the Dispersed Materials in the Chemical Industry]. Moscow, 1979. 287p. (In Russian).
- [12] Mushtaev V.I., Ul'yanov V.M., Timonin A.S. *Sushka v Usloviyah Pnevмотransporta* [Drying in the Pneumatic Transport Conditions]. Moscow, 1984. 232p. (In Russian).
- [13] Krasnikov V.V. *Konduktivnaya Sushka* [Conductive Drying]. Moscow, 1973. 288p. (In Russian).
- [14] Rudobashta S.P. *Massoperenos v Sistemakh s Tverdoi Fazoi* [Mass Transfer in the Systems with Solid Phase]. Moscow: Khimiya, 1980. 248p. (In Russian).
- [15] Akulich P.V. *Termogidrodinamicheskie Protsessy v Tekhnike Sushki* [Heat and Hydrodynamical Processes in the Drying Technics]. Minsk: Institut Teplo- i Massoobmena im. A.V. Lykova NANB, 2002. 268p. (In Russian).
- [16] Efremov G.I. *Makrokinetika Protsessov Perenosa* [Macrokinetics of Transfer Processes]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU, 2001. 289p. (In Russian).
- [17] Qu F., Qiu F., Zhu X., Ai Z., Ai Y., Ni D. Effect of Different Drying Methods on the Sensory Quality and Chemical Components of Black Tea. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie*, 2019, vol. 99, pp. 112-118. doi: 10.1016/j.lwt.2018.09.036
- [18] Zielinska M., Zielinska D., Markowski M. The Effect of Microwave-Vacuum Pretreatment on the Drying Kinetics, Color and the Content of Bioactive Compounds in Osmo-Microwave-Vacuum Dried Cranberries (*Vaccinium Macrocarpon*). *Food and Bioprocess Technology*, 2018, vol. 11, no 3, pp. 585-602. doi: 10.1007/s11947-017-2034-9
- [19] Liu H., Liu H., Liu H., Zhang X., Hong Q., Chen W., Zeng X. Microwave Drying Characteristics and Drying Quality Analysis of Corn in China. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 9. doi: 10.3390/pr9091511
- [20] De Faria R. Q., dos Santos A. R. P., Garipey Y., da Silva E. A. A., Sartori M. M. P., Raghavan V. Optimization of the Process of Drying of Corn Seeds with the Use of Microwaves. *Drying Technology*, 2019, vol. 38, no. 5-6, p. 676-684. doi: 10.1080/07373937.2019.1686009
- [21] Bahlul N., Balti M., Guellouze M.S., Kechaou N. Coupling of Microwave Radiations to Convective Drying for Improving Fruit Quality. *IDS'2018: 21st International Drying Symposium*, p. 699. doi: 10.4995/ids2018.2018.7794
- [22] Wei Q., Huang J., Zhang Z., Lia D., Liu C., Xiao Y., Lagnika C., Zhang M. Effects of Different Combined Drying Methods on Drying Uniformity and Quality of Dried Taro Slices. *Drying Technology*, 2019, vol. 37, no. 3, pp. 322-330. doi: 10.1080/07373937.2018.1445639
- [23] Yildiz G., Izli G. Influence of Microwave and Microwave-Convective Drying on the Drying Kinetics and Quality Characteristics of Pomelo.

- Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 43, no. 6. doi: 10.1111/jfpp.13812
- [24] Horuz E., Bozkurt H., Karataş H., Maskan M. Effects of Hybrid (Microwave-Convectional) and Convectional Drying on Drying Kinetics, Total Phenolics, Antioxidant Capacity, Vitamin C, Color and Rehydration Capacity of Sour Cherries. *Food Chemistry*, 2017, vol. 230, pp. 295-305. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.03.046
- [25] Abbaspour-Gilandeh Y., Kaveh M., Fatemi H., Hernández-Hernández J. L., Fuentes-Penna A., Hernández-Hernández M. Evaluation of the Changes in Thermal, Qualitative, and Antioxidant Properties of Terebinth (*Pistacia atlantica*) Fruit under Different Drying Methods. *Agronomy*, 2020, vol. 10, no. 9. doi: 10.3390/agronomy10091378
- [26] Electronic resource: <https://east-fruit.com/novosti/za-pyat-let-prodazhi-sushenykh-ovoshchey-i-fruktov-v-mire-uvlichilis-na-10/> (Accessed 12.08.2022).
- [27] Lontsyn M., Merson R. *Osnovnye Protsessy Pishchevykh Proizvodstv* [Main Processes of Food Industries]. Moscow: Legkaya i Pishchevaya Promyshlennost', 1983. 384p.
- [28] Gukhman A.A. *Primenenie Teorii Podobiya k Issledovaniyu Protsessov Teplo- i Massoobmena* [Application of the Similarity Theory to the Study of Heat and Mass Exchange Processes]. Moscow: Vysshaya shkola, 1974. 328p.

Сведения об авторах.



Бурдо Олег Григорьевич, д.т.н., профессор. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, нанотехнологии в пищевой промышленности, энергоэффективность г. Одесса, Украина
E-mail: poem.onaft@gmail.com



Терзиев Сергей Георгиевич, д.т.н. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, экоиндустрия в АПК, экстрагирование г. Одесса, Украина
E-mail: poem.onaft@gmail.com



Бурдо Алла Константиновна, к.т.н., доцент. Сфера научных интересов: технологии производства концентрированных экстрактов из растительного сырья.
E-mail:



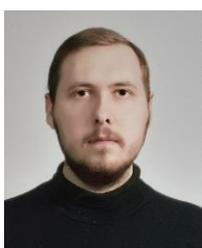
Сиротюк Илья Вадимович, ассистент. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, экстрагирование, обезвоживание пищевых продуктов, энергоэффективность г. Одесса, Украина
E-mail: ilyxin09@gmail.com



Пилипенко Евгений Александрович, аспирант. Сфера научных интересов: экстрагирование, обезвоживание пищевых продуктов.
E-mail: poem.onaft@gmail.com



Акимов Александр Викторович, аспирант. Сфера научных интересов: экстрагирование, выпарка, микроволновые технологии г. Одесса, Украина
E-mail: akimch27@gmail.com



Молчанов Михаил Юрьевич, студент. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, экстрагирование г. Одесса, Украина
E-mail: Mihatapok3@gmail.com