

## System of Innovative Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration

Burdo O.G.<sup>1</sup>, Terziev S.G.<sup>2</sup>, Gavrilov A.V.<sup>3</sup>, Sirotyuk I.V.<sup>1</sup>, Shcherbich M.V.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> PRJSC ENNI FOODS, Odessa, Ukraine

<sup>3</sup> Academy of bioresources and nature management "Vladimir Vernadskiy CFU"

**Abstract.** The market trends of food products of long-term storage, instant cooking and functional purpose are analyzed. The problems of energy technologies for the production of such concentrates were identified. The aim of the study is to develop energy technology systems that guarantee a high degree of raw material target components preservation during energy costs reducing. To achieve this aim the hypotheses of the implementation of innovative projects, based on the technology of address energy delivery to the elements of food raw materials were formulated. Physical, parametric and mathematical models of evaporators and dryers with electromagnetic energy sources were presented. The results of a study of the drying kinetics on a belt plant with combined infrared and microwave generators were analyzed. The most significant results of the work are: mathematical models of heat and mass transfer processes under the electromagnetic energy action, a complex of kinetic dependences during plant material drying, samples of innovative equipment for dehydration of food raw materials using microwave and infrared energy sources. The significance of the obtained results lies in the fact that energy-intensive drying is excluded from traditional technologies for the concentrate production. Implementation of innovative projects for the concentrate production from food raw materials in the extractors and evaporators reduces energy expenditures by 1.5–2 times from 39.5 MJ per kg of removed moisture to 11.4 MJ. High quality products are ensured, since more than 80% of the volatile aromatic and flavoring compounds that are lost in the spray dryer are fully preserved.

**Keywords:** food concentrates, energy technologies, modeling, infrared and microwave apparatuses, heat and mass transfer.

**DOI:** 10.5281/zenodo.3898317

**UDC:** 664.87.093.48:621.037-027.236:005.591.6

### Sistem de tehnologii energetice inovatoare pentru deshidratarea alimentelor

Burdo O.G.<sup>1</sup>, Terziev S.G.<sup>2</sup>, Gavrilov A.V.<sup>3</sup>, Sirotyuk I.V.<sup>1</sup>, Scherbich M.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Academia Națională de Tehnologii Alimentare din Odessa, Odessa, Ucraina

<sup>2</sup> Societatea publică pe acțiuni "Annie Foods", Odessa, Ucraina

<sup>3</sup> Academia de Bioresurse și Management al Naturii "KFU V.I. Vernadsky"

**Rezumat.** Sunt analizate tendințele de piață ale produselor alimentare de depozitare pe termen lung, preparare rapidă și destinația funcțională. Sunt identificate problemele tehnologiilor energetice pentru producerea de astfel de concentrate. Se are în vedere clasificarea proceselor de deshidratare a materiilor prime. Scopul lucrării este de a dezvolta sisteme de tehnologie energetică care, deși reduc costurile de energie, garantează un grad ridicat de conservare a componentelor țintă ale materiilor prime. Pentru a atinge acest obiectiv, ipotezele sunt formulate pe baza tehnologiilor propuse de autori pentru furnizarea de energie orientată către elementele materiilor prime alimentare. Sunt prezentate rezultatele confirmării experimentale a ipotezelor propuse privind echipamentele inovatoare - dispozitive cu microunde pentru extracție și evaporare. Sunt analizate rezultatele unui studiu privind cinetica uscării pe o instalație cu bandă cu generatoare combinate cu infraroșu și cu microunde. Este demonstrat, că numărul efectelor energetice rezumă corect rezultatele experimentelor la uscare, extracție și evaporare. Sunt propuse metode de calcul pentru calculul echipamentelor de transfer de căldură și masă cu surse de energie electromagnetică, pe baza modelelor cretitriale elaborate de autori. Rezultatele cele mai semnificative ale lucrării sunt: modele matematice ale proceselor de transfer de căldură și masă sub acțiunea surselor de energie electromagnetică, un complex de dependențe cinetice în timpul uscării materialelor vegetale, probe de echipamente inovatoare pentru deshidratarea materiilor prime alimentare cu ajutorul microundelor și a surselor de energie infraroșu. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că uscarea cu consum mare de energie este exclusă din tehnologiile tradiționale pentru producerea de concentrate.

**Cuvinte-cheie:** concentrate alimentare, tehnologii energetice, modelare, dispozitive infraroșu și cu microunde, transfer de căldură și masă.

**Система инновационных энерготехнологий обезвоживания пищевого сырья****Бурдо О.Г.<sup>1</sup>, Терзиев С.Г.<sup>2</sup>, Гаврилов А.В.<sup>3</sup>, Сиротюк И.В.<sup>1</sup>, Щербич М.В.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, Украина<sup>2</sup>Публичное акционерное общество «Энни Фудз», Одесса, Украина<sup>3</sup>Академия биоресурсов и природопользования «КФУ им. В.И. Вернадского»

**Аннотация.** Анализируются тенденции рынка пищевых продуктов длительного хранения, быстрого приготовления и функционального назначения. Определены проблемы энерготехнологий производства таких концентратов. Цель работы - разработать системы энерготехнологий, которые при снижении затрат энергии гарантируют высокую степень сохранности целевых компонентов сырья. Для достижения поставленной цели сформулированы гипотезы, в основе которых предложенные авторами технологии адресной доставки энергии к элементам пищевого сырья. Представлены физические, параметрические и математические модели выпарных и сушильных аппаратов с электромагнитными источниками энергии. Методами теории подобия модели приведены к уравнениям в обобщенных переменных. Приведены результаты экспериментального подтверждения предложенных гипотез на инновационном оборудовании – микроволновых аппаратах для экстрагирования и выпаривания. Анализируются результаты исследования кинетики сушки на ленточной установке с комбинированными инфракрасными и микроволновыми генераторами. Показано, что число энергетического воздействия корректно обобщает результаты экспериментов и по сушке, и по экстрагированию, и по выпариванию. Предложены инженерные методы расчета тепломассообменного оборудования с электромагнитными источниками энергии, в основе которых разработанные авторами критериальные модели. Наиболее существенными результатами работы являются: математические модели процессов тепломассообмена в условиях действия электромагнитных источников энергии, комплекс кинетических зависимостей при сушке растительного сырья, образцы инновационного оборудования для обезвоживания пищевого сырья с использованием микроволновых и инфракрасных источников энергии. Значимость полученных результатов состоит в том, что из традиционных технологий получения концентратов исключается энергозатратная сушка. Реализация инновационных проектов получения концентратов из пищевого сырья в системе экстракционных и выпарных аппаратов в 1,5 – 2 раза снижает затраты энергии с 39,5 МДж на кг удаленной влаги до 11,4 МДж. Обеспечивается высокое качество продуктов, поскольку более 80% летучих ароматических и вкусовых соединений, которые теряются в распылительной сушилке, полностью сохраняются.

**Ключевые слова:** пищевые концентраты, энерготехнологии, моделирование, инфракрасные и микроволновые аппараты, тепло- и массообмен.

**ВВЕДЕНИЕ**

Традиционное направление исследований путей увеличения продолжительности хранения концентратов – совершенствование упаковки. Так, исследования, проведенные в министерстве сельского хозяйства США [1], были направлены на согласование режимов конвективной сушки, параметров продукта (хурмы в виде чипсов толщиной 2 мм и 6 мм) с разработанной специальной упаковкой. Срок хранения хурмы продлен до года, но отмечена существенная потеря витаминов и ухудшение качества из-за длительной термической обработки. Национальный университет Мексики (штат Морелос) рекомендует использовать солнечную сушку, сушку ультрафиолетовыми лучами для увеличения срока хранения концентратов из растительного сырья [2]. Прогрессивным направлением - использованием упаковки из наноматериалов - занимаются в Китае, в Университет Цзяннань. Пройден этап лабораторных исследований. Однако, пока не изучен риск проникновения наноматериалов

в структуру продукта. Университет Квинсленда, Австралия) [3].

Активно исследуются режимы концентрирования соков и экстрактов [4-8]. Предлагается проводить концентрирование сока шпината с использованием ультразвука (40 кГц, 200 Вт, 30°C) и импульсного электрического поля (частота импульса 1 кГц, мощность ЭП 9 кВ/см, расход 60 мл/мин, 30°C) (Университет правительственного колледжа, Пакистан; Университет Дзяннань, Китай) [4]. Мунзурский университет и Эгейский университет (Турция) представили исследования концентрирования до 65% сока вишни с использованием вакуум-выпарки (25 кПа) при температуре до 65°C [5]. В обзорной статье Индийского технологического института (Дханбад, Индия) [6] анализируются режимы концентрирования различных соков с использованием мембранных технологий. Диапазон достигнутых концентраций 35-72 °brix, при температурах 20-70°C. Процессы экстрагирования фенольных компонентов и натуральных антиоксидантов из съедобного

папоротника с использованием микроволновых технологий исследованы в Уттаранчалском университете (Индия) [7]. Процессы экстрагирования 50% раствором этанола антоцианинов из акебии трехлистной посредством радиочастотного нагрева изучены в Шанхайском университете Цзяо Тонг, Китай и Орегонском государственном университете, США [8]. За 10 минут при температуре 40°C выход неочищенного продукта составил 26,55%, а содержание антоцианинов 50,87 мг / 100 г порошка акебии.

Широко ведутся исследования по совершенствованию процессов при производстве разнообразных порошков. Индийский колледж молочных технологий анализирует получение сухого молока в распылительной сушилке после выпарки [9]. Применение ультразвука при получении порошков фруктовых и овощных соков в распылительной сушилке предлагает университет Чжэцзян, Китай [10]. Ультразвук, создавая резонансные механические волны, способствует усилению атомизации растворов. В комбинации с вакуумной сушкой позволяет снизить температуру сушки до 60°C после атомизации растворов в распылительной сушилке. Использование осушенного воздуха позволяет снизить температуру и влажность порошка на выходе. В результате гарантируется более высокое качество продукта, чем при обычной распылительной сушке.

Перспективное направление применения микроволновой сушки при получении порошка растительного масла развивается в технологическом институте (Харагпур, Индия) [11]. При мощности поля 170-200 Вт время сушки составило 10-17 минут, а конечная влажность 4-6%. Сравнение качества сушки готовых первых, вторых блюд и десертов на распылительной и сублимационной установках проводится в университете Чианг Май, Таиланд [12]. Основным результатом работы [12] в том, что удалось получить экстракт магнолии в капсулах, который используется для приготовления тайского десерта из рисовой муки.

Наряду с проблемами обезвоживания растут требования к соответствию продукции принципам функционального питания, основные из которых: сохранение и

улучшение здоровья, снижение риска развития заболеваний, связанных с питанием [13].

Выполненный обзор показывает, внимание к теоретическим и техническим проблемам обезвоживания повышается. Именно технологии обезвоживания являются ответственными как за себестоимость продукции, так и за сохранность пищевой ценности сырья. Развитие науки и техники обезвоживания идет по пути поиска решений на базе различных источников энергии, в условиях роста цены на энергоносители. Как правило, в обществе возрастает требовательность относительно качества готового продукта, сохранность которого требует повышения энергетических затрат. Возникает технологическое противоречие, решение которого определяется эффективностью использования энергии. Перед производителями концентратов стоит задача максимально возможного снижения затрачиваемой на процесс энергии наряду с сохранением высокого качества продукта [14]. Решением такой задачи и посвящена настоящая работа.

### **АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ФОРМУЛИРОВКА НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКОЙ ГИПОТЕЗЫ**

В технике обезвоживания используются 3 принципа удаления влаги: мембранный, выпаривание и криоконцентрирование. Всем присущи и достоинства, и недостатки.

Мембранные технологии получают все большее распространение в задачах опреснения и очистки сточных вод [15]. Для концентрирования соков и экстрактов мембранные технологии не получают распространения. Наибольшее применение для концентрирования пищевых растворов имеют выпарные технологии [16]. Объясняется это тем, что аппараты для выпаривания предельно просты, обеспечивают высокую производительность [16]. Вместе с тем, требования к качеству концентрата постоянно повышаются. При этом, главной проблемой выпарных аппаратов является то, что с повышением концентрации раствора растет его вязкость, интенсивность циркуляции раствора в аппарате снижается, растет термическое сопротивление пограничного слоя и его температура. Удачных решений этой проблемы не найдено. На практике

ограничиваются значением конечной концентрации готового продукта (от 25 до 60%).

Высокое качество готового продукта обеспечивают технологии криоконцентрирования [17], особенно блочного вымораживания. Вместе с тем, несмотря на энергетические характеристики и гарантии высокого качества готового продукта, технологии криоконцентрирования ограничены конечными концентрациями до 50 °brix.

Задачи обезвоживания сырья с наличием твердой фазы решаются с помощью сушки, конструкции которых отличаются значительным разнообразием, а теория предельной сложностью среди всех массообменных процессов. При этом сушильные технологии являются и наиболее энергоемкими в пищевых производствах.

Энергетический аудит показывает, что наибольшие затраты энергии требует распылительная сушка. Ощутимые расходы энергии в ленточной сушилке, выпарном аппарате, в экстракторах.

Поэтому в работе поставлены задачи:

1) исключить из технологии энергорасточительную распылительную сушилку;

2) разработать технологию концентрирования пищевых растворов, которая при высокой эффективности использования энергии и сохранении пищевой ценности продукта, обеспечивала бы выше, чем у традиционных технологий, значения конечных концентраций;

3) повысить энергетическую эффективность ленточной сушилки при снижении уровня термического воздействия на сырье.

Предлагаемые инновационные проекты основаны на следующих гипотезах.

**Гипотеза 1.** Перевод сушильной техники на электромагнитные источники энергии приведет к снижению затрат энергии на сушку в связи с направленным, регулируемым подводом энергии к сырью, отсутствием потерь энергии с отработавшим сушильным агентом, возможностью утилизации энергии удаленного из сырья пара.

**Гипотеза 2.** Согласование параметров электромагнитного поля и структуры сырья позволит организовать процесс

экстрагирования в режиме «бародиффузии», что может снизить энергетические затраты и повысить концентрацию экстракта.

**Гипотеза 3.** Переход от граничных условий (ГУ) 3 рода к ГУ 2 рода в выпарных аппаратах позволит реализовать инновационный способ адресной доставки энергии непосредственно к влаге сырья. В таких установках нивелируется влияние вязкости продукта, исчезает понятие термического пограничного слоя, появляется возможность стабилизации величины паропроводительности в широком диапазоне концентраций продукта. Реализуется отвод пара из всего объема жидкости без термической порчи продукта в пограничном слое. В результате получится продукт высокой концентрации, без привкуса «варки», без изменения цвета и аромата.

Условием функционирования аппаратов с электромагнитным подводом энергии являются следующие факторы:

- наличие в объеме продукта жидкости с полярными молекулами;
- соответствие параметров электромагнитного поля решаемой задачи теплопереносу;
- согласование структурных характеристик продукта с параметрами электромагнитной энергии.

Для подавляющего вида пищевого сырья указанные условия выполняются.

Системный анализ традиционной и инновационной технологий обезвоживания.

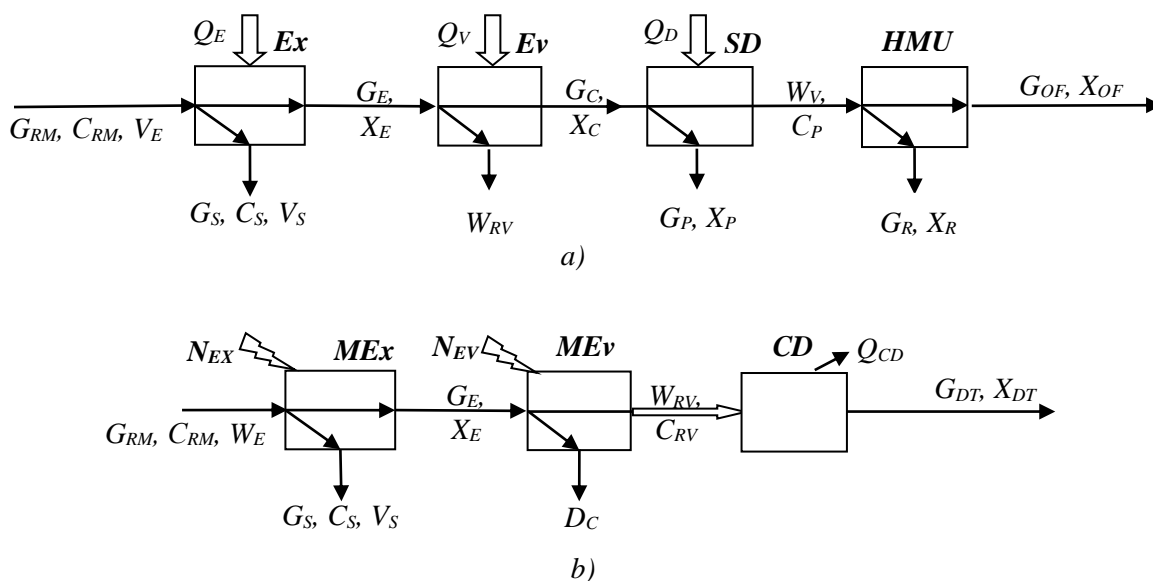
Предложенная научно-техническая концепция определяет: «в условиях ЭМП можно организовать адресную доставку энергии к полярным молекулам элементов сырья и обеспечить выход из сырья специфического потока, который содержит традиционную паровую фазу (диффузионный поток), и жидкость (гидравлический поток).

Идея иллюстрируется схемами потоков энергии и сырья в традиционных решениях (рис. 1а) и при инновационном подходе (рис. 1б). Типичные технологии производства порошков из экстрактов основаны на трех энергоемких процессах: экстрагирование, выпарка и сушка. В экстрактор ( $Ex$ ) поступает растительное сырье, расход которого  $G_{RM}$ , содержание целевых компонентов  $C_{RM}$ , и экстрагент  $V_E$  (рис. 1а). Для интенсификации процесса

экстрагирования максимально повышают температуру за счет энергии  $Q_E$ . На выходе из аппарата получают экстракт с содержанием целевых компонентов  $X_E$ . В выпарном аппарате ( $E_V$ ) при затратах энергии  $Q_V$  концентрация повышается до  $X_C$ . Наибольшие затраты энергии  $Q_D$  при сушке концентрированного экстракта в распылительной сушилке ( $SD$ ) до состояния порошка  $X_P$ .

Эффективность использования энергетических и сырьевых ресурсов повышает

тепломассоутилизатор ( $HMU$ ), который возвращает в технологию экстракт  $X_R$  и энергию. В инновационном проекте (рис. 1б) исключена распылительная сушилка. Технологии адресной доставки энергии решают задачи существенного повышения концентрации раствора как в экстракторе, так и при выпаривании. Сравнение ключевых технологических характеристик приведено в табл. 1, а энергетических – в табл. 2.



a) традиционные технологии; b) инновационные проекты.

Рис. 1. Схема материальных и энергетических потоков. <sup>1</sup>

Таблица 1<sup>2</sup>.

Сводка основных режимных параметров традиционной и инновационной технологий <sup>3</sup>

Аппарат Apparatus	Процесс Process	Структура потока / Flow structure	
		На входе / Input	На выходе / Output
Традиционная технология / Traditional technology			
Экстрактор Extractor ( $Ex$ )	Экстрагирование Extraction	Сырье / Raw material $C_{RM} = 20-33\%$ Экстрагент – вода Extractant – water ( $t = 170\text{ °C}$ )	Экстракт / Extract $X_E = 19\%$ , Шлам / Sludge $C_S = 4-7\%$

Продолжение таблицы 1<sup>4</sup>.

Аппарат 1, 2, 3 Appendix 1	Процесс Process	Структура потока / Flow structure	
		На входе / Input	На выходе / Output
Традиционная технология / Traditional technology			

Выпарной аппарат Evaporator ( <i>Ev</i> )	Концентрирование Concentration	Экстракт / Extract $X_E = 19\%$ , Масса 5 кг / Mass 5 kg	Экстракт / Extract $X_C = 28\%$ , Масса 3,4 кг Mass 3,4 kg
Сушилка Dryer ( <i>SD</i> )	Распылительная сушка Spray drying	Экстракт / Extract $X_C = 28\%$ Сушильный агент, $t = 140\text{ }^\circ\text{C}$	Порошок / Powder $X_P = 95\%$
Инновационный проект / Innovative project			
Экстрактор Extractor ( <i>MEx</i> )	Экстрагирование Extraction	Сырье / Raw material $C_{RM} = 20\text{-}33\%$ Экстрагент – вода Extractant – water	Экстракт / Extract $X_E = 40\%$ , Шлам / Sludge $C_S = 0,5\%$
Выпарной аппарат Evaporator ( <i>MEv</i> )	Концентрирование Concentration	Экстракт / Extract $X_E = 40\%$ , Масса 2,42 кг / Mass 2,42 kg	Экстракт / Extract $X_C = 80\text{-}85\%$

Сравнение энергетики технологий проводилось как по коэффициенту удельного энергопотребления  $j$ , так и относительно необходимых удельных затрат  $d$  топлива [20],

поскольку инновационные технологии предусматривают электромагнитные генераторы.

Таблица 2<sup>5</sup>.

Сводка основных энергетических параметров традиционной и инновационной технологий <sup>6</sup>

Показатели Measures	Экстрактор Extractor	Выпарка Evaporator	Сушка Dryer	Суммарные Total
Традиционная технология / Traditional technology				
$j$ , МДж/кг MJ/kg	$Q_E = 9,76$	$Q_V = 4,6$	$Q_D = 25,16$	$Q_T = 39,52$
$d$ , м <sup>3</sup> /кг m <sup>3</sup> /kg	0,35	0,16	1,25	1,76
Инновационный проект / Innovation project				
$j$ , МДж/кг MJ/kg	$N_{EX} = 5,04$	$N_{EV} = 11,5$	0	$N_T = 11,39$
$d$ , м <sup>3</sup> /кг m <sup>3</sup> /kg	0,39	0,5	0	0,89

Все параметры в табл. 1 и 2 нормируются 1кг готового продукта. При расчетах (табл. 2) принято: КПД конверсии энергии топлива в цепи «газ – пар» – 0,7; в цепи «газ – сушильный агент» – 0,5; в цепи «газ – электроэнергия» – 0,32.

По результатам исследований сделано два вывода.

1. Инновационный проект требует затрат энергии в 3,5 раз меньше, чем традиционный, а в пересчете на первичное топливо – в 2 раза меньше.

2. В традиционных технологиях более 80% летучих ароматических соединений тер: <sup>4, 5, 6</sup> Appendix 1 тельной сушилке. В инновационной технологии сушка

отсутствует, что гарантирует практически полное сохранение вкусовых и ароматических компонентов.

Следующей задачей работы является модернизация ленточной сушильной установки, где продукт обрабатывается в тонком слое. Техническая идея модернизации ленточной сушилки сформулирована в следующей гипотезе. «Комбинированное, последовательное воздействие на влажный продукт электромагнитными полями разной частоты позволит инициировать поток влаги из объема сырья за счет действия разных движущих сил: бародиффузионных (обеспечивающих снижение внутреннего диффузионного сопротивления), и

конвективных (обеспечивающих удаление влаги с поверхности сырья). Объемный подвод энергии можно осуществлять микроволновыми интенсификаторами, а поверхностный - инфракрасными». В результате сократятся время процесса и величина энергетических затрат.

Выполним анализ объема сырья, содержащего систему связанных нанокапилляров и микрокапилляров. Под действием ЭМП из сырья выходит поток влаги в виде парожидкостной смеси. Схема потока представляется эквивалентной электрической схемой (рис. 2).

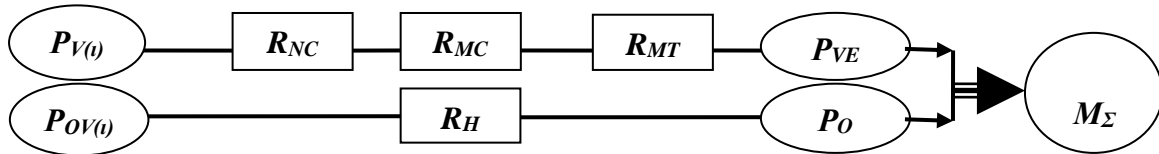


Рис. 2. Эквивалентная электродиффузионная схема сопряженных процессов переноса влаги из системы капилляров. <sup>7</sup>

Здесь  $P_V(\tau)$  – текущие в сырье значения парциальных давлений водяных паров;  $M_\Sigma$  – общее количество удаленной влаги;  $P_{VE}$  – парциальные давления водяных паров в окружающей среде,  $P_{OV}(\tau)$  – избыточное давление в канале.

Традиционной схеме массопереноса при сушке отвечает только верхняя цепь рис. 3.

Здесь последовательная цепочка диффузионных сопротивлений состоит из суммы:  $R_{NC}$  (нанокапилляры),  $R_{MC}$  (микрокапилляры) и  $R_{MT}$  (массоотдачи). Вторая цепочка – это гидравлический поток, который преодолевает гидравлическое сопротивление  $R_H$ .

Суммарный поток всех компонентов в интегральной форме определится:

$$M_\Sigma = (M_P + M_L)F^{-1} = \frac{P_V - P_{VE}}{R_D} + \rho \left[ \frac{P_{OV} - P_O}{R_H} \right] \quad (1)$$

Специфика механизмов переноса в (1) определяется движущей силой. Для диффузионного потока это разность парциальных давлений, а для потока парожидкостной смеси – разность внутрикапиллярного и атмосферного давлений. Второй поток – инерционный, стадии его формирования следующие. За счет

концентрации электромагнитной энергии в глубине капилляра формируется центр парообразования, что приводит к росту давления в канале. В результате происходит выброс влаги из каналов в среду.

Проведем анализ инновационной сушки на основе электродиффузионных моделей (рис. 3, 4).

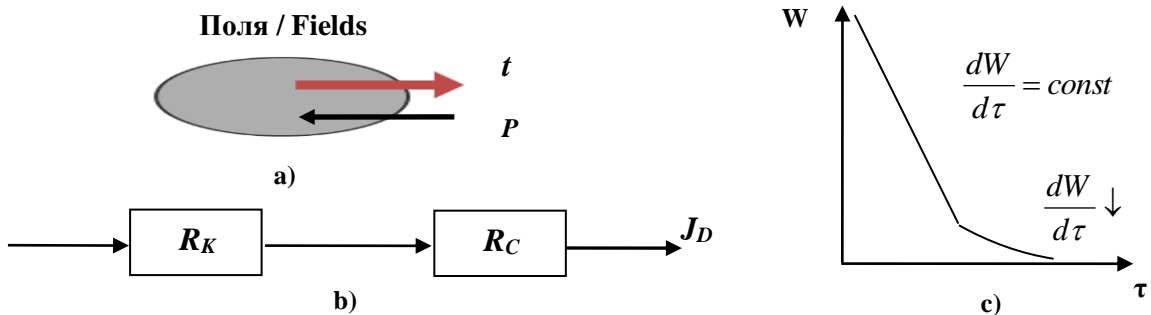


Рис. 3. Электродиффузионная модель традиционной конвективной сушки. <sup>8</sup>

В традиционной сушке влага преодолевает внутридиффузионное сопротивление ( $R_K$ ) и диффузионное сопротивление конвективной массопереноса ( $R_C$ ). Из сырья удаляется <sup>7,8</sup> Appendix 1

диффузионный поток ( $J_D$ ) (рис. 3). Специфично выглядят процессы сушки в условиях электромагнитного поля (рис. 4).

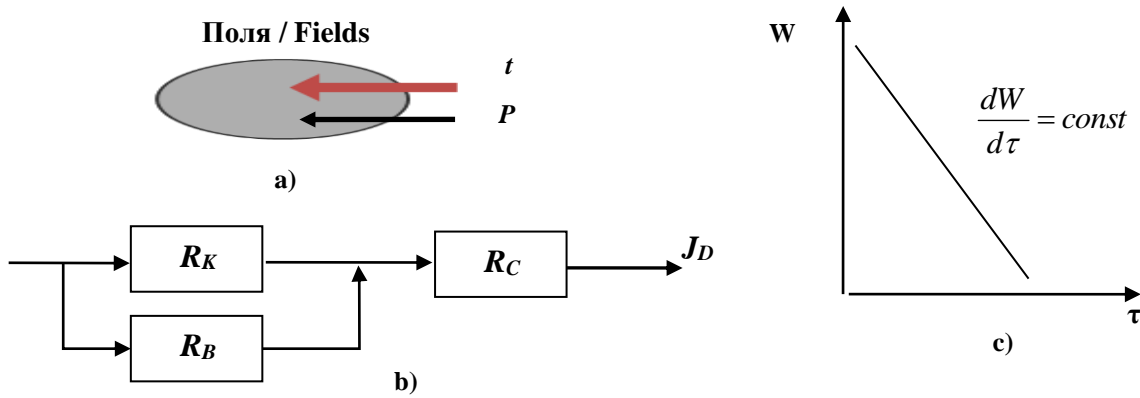


Рис. 4. Электродиффузионная модель бародиффузии. <sup>9</sup>

Если в традиционных схемах сушки выражены периоды постоянной и падающей скоростей (рис. 3), то в инновационных сушилках микроволновая энергия обеспечивает постоянную подпитку влагой поверхность продукта за счет ламинарной бародиффузии (рис. 4). В традиционных сушилках градиенты температур и давлений направлены противоположно (рис. 3). Самая высокая температура всегда на поверхности материала. В инновационных установках самая высокая температура в глубине продукта (рис. 4).

Таким образом, специфический источник энергии в виде электромагнитного поля определяет особенности моделирования процессов обезвоживания.

**Результаты математического и экспериментального моделирования процессов обезвоживания в условиях электромагнитного поля.**

Основные элементы ленточной сушильной установки с электромагнитными источниками энергии и режимы их работы представлены схемой (рис. 5).

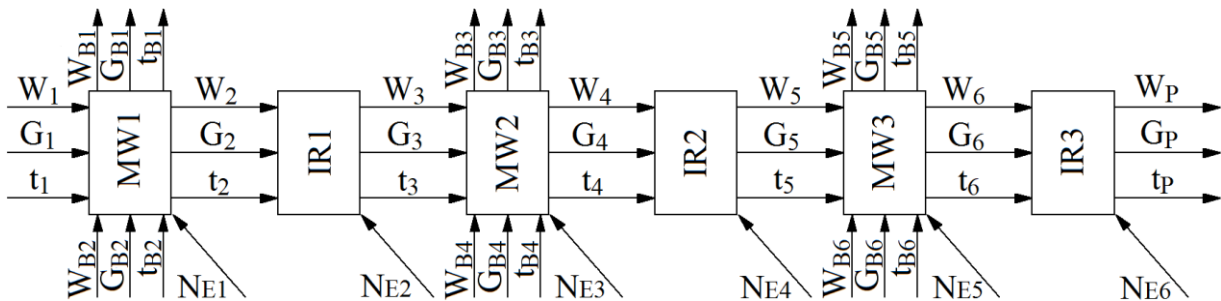


Рис. 5. Аппаратурно-процессовая схема ленточной сушилки. <sup>10</sup>

Соответствующая (рис. 5) параметрическая модель формирует связь параметров качества с параметрами сырья, конструкцией установки и энергетическими характеристиками. Параметрами качества являются влагосодержание готового продукта  $W_p$  и удельные затраты энергии на сушку  $j$ , Дж/кг. Ключевыми входными параметрами сырья считаются: его расход  $G_1$ , кг/с; влагосодержание  $W_1$ ; температура  $t_1$ ; теплофизические свойства ( $a_c, c_c, \rho_c, \lambda_c, v_c, r_e$ ). Поток воздуха, проходящего последовательно через камеры сушилки, характеризуется <sup>9,10</sup> Appendix 1 о расходом  $G_B$ ,

влагосодержанием  $W_B$ , скоростью  $v$  и температурой  $t_B$ . Основными характеристиками установки являются конструктивные параметры ленты: ее ширина  $B$ , длина  $L$ , толщина  $\delta_L$ ; скорость перемещения  $w$  и площадь поверхности  $F$ . Энергетические параметры установки – мощность ( $N_{MW}, N_{IR}$ ) и КПД ( $\eta_{MW}, \eta_{IR}$ ), соответственно, микроволновых и инфракрасных генераторов.

Постановка задачи моделирования представлена физической схемой сушилки с комбинированными ИК и МВ генераторами энергии (рис. 6).



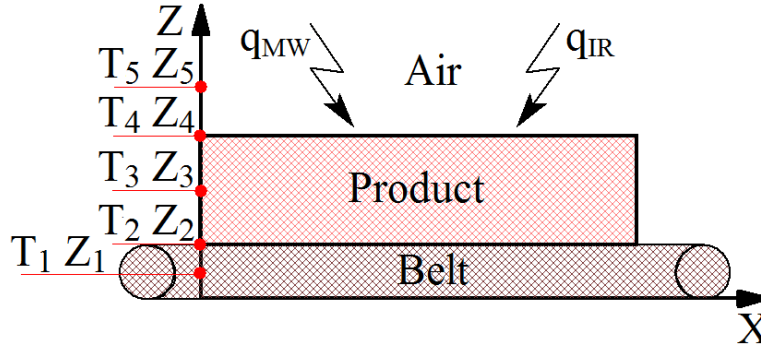


Рис. 6. Физическая модель процесса сушки.<sup>11</sup>

Нестационарная модель тепломассопереноса формируется в двумерном представлении, относительно осей (Z) и (X). При  $Z > Z_4$  (воздушный объем):

$$\rho_g \cdot \omega_g \cdot \left( \frac{\partial \omega_g}{\partial x} + \frac{\partial \omega_g}{\partial z} \right) = \rho_g \cdot g - \frac{\partial P_g}{\partial x} - \frac{\partial P_g}{\partial z} + \mu_g \cdot \left( \frac{\partial^2 \omega_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_g}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left( \frac{\partial^2 t_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_g}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_{IR}}{c_c \rho_c} + \frac{q_{MW}}{c_c \rho_c} \right] \quad (5)$$

Уравнение сплошности:

$$\frac{1}{\rho_g} \cdot \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \omega_g}{\partial y} + \frac{\partial \omega_g}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Уравнение Фика:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D \left( \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial W}{\partial z} \nu_z \quad (6)$$

В объем продукта, при  $Z_4 < Z < Z_2$  действуют электромагнитные источники энергии при граничных условиях II рода:

При возвратном движении ( $Z = Z_1$ ) лента имеет контакт с воздухом. Здесь следует записать аналогичные (2) уравнение Навье – Стокса, (3) – уравнение энергии, и (4) – уравнение сплошности.

Таблица 3<sup>12</sup>.

Сводка граничных условий модели сушки<sup>13</sup>

Координата по рис. 7 Coordinate on fig. 7	Тип ГУ BC type	Модель ГУ BC model
$Z = Z_4$ (граница сырья и окружающей среды / border of raw material and environment)	III рода / type	$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_B}{\lambda_C} (t_C - t_B)$ (7)
$Z_2 < Z < Z_4$ (объем сырья / raw material volume)	II рода / type	$q_v = q_{MW} + q_{IR} = const$ (8)
$Z = Z_2$ (граница сырья и ленты / border of raw material and belt)	IV рода / type	$\lambda_C \frac{\partial t}{\partial n} \Big _{bd1} = \lambda_{bt} \frac{\partial t}{\partial n} \Big _{bd2}$ (9)
$Z = Z_1$ (граница ленты и окружающей среды / border of belt and environment)	III рода / type	$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_B}{\lambda_{bt}} (t_{bt} - t_B)$ (10)

Система уравнений (2) – (10) представляет нестационарное двумерное поле температур и в <sup>11, 12, 13</sup> Appendix 1

связано с положением на ленте. Представляет модель сопряженных теплоаэродинамических и массообменных

процессов переноса. Систему следует дополнить уравнениями, характеризующими соответствующие начальные условия, и соотношениями связи для каждой среды и продукта.

Аналитическое решение поставленной модели не осуществимо. Поэтому дальнейшие исследования направлены на упрощение полученной модели, приведению краевой задачи сушки к модели в обобщенных переменных.

В основе исследований использована вторая теорема подобия Федермана – Бекингема, которая дает методику корректной постановки экспериментов и обработки их результатов [18]. Принято кинетическим коэффициентом, который определяет интенсивность процесса сушки, считать коэффициент массоотдачи. В задаче, которая решается, сушка осуществляется двумя потоками: диффузионным и гидродинамическим. Поэтому, результатом преобразований должна стать модель в

обобщенных переменных, которая бы учитывала специфику задачи. Во-первых, введем параметр, который учитывает результирующий поток влаги ( $\beta_E$ ) – эффективный коэффициент массоотдачи. Диффузионный поток определяется скоростью потока воздуха ( $v$ ), его плотностью ( $\rho$ ) и вязкостью ( $\mu$ ); скоростью движения ленты транспортера ( $w$ ) и толщиной слоя продукта на ленте ( $\delta$ ); движущей силой процесса, т.е. разностью концентраций ( $\Delta X$ ) и гравитационной константой ( $g$ ). Интенсивность второго потока зависит от мощности излучения ( $N$ ), удельной теплотой фазового перехода ( $r$ ), плотности жидкости ( $\rho_L$ ) и ширины ленты ( $B$ ). В такой постановке ( $\beta_E$ ) учитывает и диффузионные, и термические, и гидродинамические сопротивления. Сводка основных факторов, которые определяют ( $\beta_E$ ), приведена в табл. 4.

Таблица 4<sup>14</sup>.

Основные параметры процесса сушки в электромагнитном поле <sup>15</sup>

Параметр / Parameter	Символ Symbol	Размерность Dimension
Эффективный коэффициент массоотдачи Mass transfer coefficient	$\beta_E$	$m \cdot c^{-1}$ $m \cdot s^{-1}$
Толщина слоя Layer thickness	$h$	$m$ $m$
Плотность потока воздуха Air flow density	$\rho$	$kg \cdot m^{-3}$ $kg \cdot m^{-3}$
Вязкость потока воздуха Air flow viscosity	$\mu$	$kg \cdot m^{-1} \cdot c^{-1}$ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
Скорость потока воздуха Air flow speed	$v$	$m \cdot c^{-1}$ $m \cdot s^{-1}$
Коэффициент диффузии Diffusion coefficient	$D$	$m^2 \cdot c^{-1}$ $m^2 \cdot s^{-1}$
Удельная теплота парообразования Specific heat of evaporation	$r$	$m^2 \cdot c^{-2}$ $m^2 \cdot s^{-2}$
Мощность микроволнового поля Microwave field power	$N$	$kg \cdot m^2 \cdot c^{-3}$ $kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
Плотность потока влаги Moisture flow density	$\rho_L$	$kg \cdot m^{-3}$ $kg \cdot m^{-3}$
Разность концентраций Concentrate difference	$\Delta X$	$kg \cdot m^{-3}$ $kg \cdot m^{-3}$
Гравитационная постоянная Gravity constant	$g$	$m \cdot c^{-2}$ $m \cdot s^{-2}$

Продолжение таблицы 4<sup>16</sup>.

Параметр / Parameter	Символ Symbol	Размерность Dimension
<sup>14, 15</sup> Appendix 1	$B$	$m$

Layer width		m
Скорость ленты Belt speed	$w$	$m \cdot s^{-1}$ $m \cdot s^{-1}$

Все эти параметры, представленные в таблице 4, содержат только три основных размерности: длину ( $L$ ), массу ( $M$ ) и время ( $\tau$ ).

На основе метода анализа размерностей, искомую функцию  $\beta_E$  представим зависимостью между числами подобия. В данном случае число переменных  $n = 13$ , число единиц измерения  $m = 3$ . Тогда, согласно  $\pi$ -теореме, число безразмерных

комплексов, описывающих процесс, должно быть равно  $(n - m) = 10$ .

Параметры  $h, \rho, \mu$  принимаем общими для всех безразмерных групп.

Тогда, для первой группы запишем:

$$\pi_1 = h^a \rho^b \mu^c \beta_E^g \quad (11)$$

Для уравнения (11) размерная матрица имеет вид:

Таблица 5<sup>17</sup>.

Размерная матрица<sup>18</sup>

	$a$	$b$	$c$	$g$	Уравнения / Equations
$M$		1	1		$b + c = 0$ (12)
$L$	1	-3	-1	1	$a - 3b - c + g = 0$ (13)
$\tau$			-1	-1	$-c - g = 0$ (14)

Решением системы уравнений (таблица 5) является:  $a = b = -c = g$ . Поэтому:

$$\pi_1 = (h \cdot \rho \cdot \beta_E) / \mu \quad (15)$$

Следующие комплексы определим аналогично (16), путем объединения  $h, \rho, \mu$  с параметрами, что остались (табл. 6).

Отношение внешнедиффузионного потока к внутридиффузионному учитывается числом Пекле ( $\pi_9$ ). Геометрию размещения продукта учитывает фактор формы – безразмерный параметрический комплекс ( $\pi_{10}$ ).

$$\left. \begin{aligned} \pi_2 = \frac{\Delta X}{\rho}; \quad \pi_3 = \frac{h^3 \rho^2 g}{\mu^2}; \quad \pi_4 = \frac{h \rho w}{\mu}; \\ \pi_5 = \frac{\rho D}{\mu}; \quad \pi_6 = \frac{h^2 \rho_L^2 r}{\mu^2}; \quad \pi_7 = \frac{h \rho_L^2 N}{\mu^3}; \end{aligned} \right\} (16)$$

Эти уравнения вместе с (15) и системой (16) используется для поиска комбинаций, которые дадут структуру уравнения в обобщенных переменных (табл. 6).

Таблица 6<sup>19</sup>.

Комбинации параметров и числа подобия<sup>20</sup>

№	Параметр Parameter	Модель / Model	Обобщенные числа подобия Generalized similarity number
1	$\pi_1$	$(\beta \rho h) / \mu = (\beta h) / \nu$	Безразмерный коэффициент массоотдачи Dimensionless mass transfer coefficient
2	$\pi_4$	$Re = (h \rho w) / \mu = (h w) / \nu$	Число Рейнольдса / Reynolds number
3	$(\pi_5)^{-1}$	$Sc = (\rho D) / \mu$	Число Шмидта / Schmidt number

Продолжение таблицы 6<sup>21</sup>.

№	Параметр	Модель / Model	Обобщенные числа подобия Generalized similarity number
16, 17, 18, 19, 20 Appendix 1			

4	$\pi_5/\pi_1$	$Sh = (\beta_E h)/D$	Число Шервуда / Sherwood number
5	$\pi_1/\pi_4$	$St_\delta = \beta_E/w$	Число Стантона / Stanton number
6	$\pi_2\pi_3(\pi_8)^3$	$Gr_\delta = gh^3\rho\Delta X\mu^{-2}$	Диффузионное число Грасгофа Grashof diffusional number
7	$\pi_9$	$Pe_\delta = vh/D$	Диффузионное число Пекле Peclet diffusional number
8	$\pi_7(\pi_4\pi_6)^{-1}$	$Bu = N(rv h^2\rho_L)^{-1}$	Число энергетического действия Number of energetic effects
9	$\pi_{10}$	$Ff = h/B$	Фактор формы / Form factor

Физический смысл числа энергетического действия  $Bu$  заключается в том, что устанавливается соотношение величины затраченной электромагнитной энергии, и энергии базового процесса. Такой базовой энергией может считаться энергия, которая характерна для традиционной технологии.

С ростом  $N$  растет значение числа  $Bu$ , растет разность давлений, интенсифицируются выбросы из капиллярной

структуры. Это приведет к росту коэффициента  $\beta_E$ . Более того, эти выбросы турбулизируют и пограничный слой. Следовательно, число  $Bu$  может характеризовать не только степень энергетического воздействия, но и соответствующую гидравлическую ситуацию над слоем продукта.

Таким образом, получаем:

$$St_m = A \cdot (Re)^q \cdot (Gr_\delta)^g \cdot (Sc)^n \cdot (Bu)^p \cdot (Pe_\delta)^m \cdot (Ff)^k \quad (17)$$

В рамках исследуемой задачи можно пренебречь числом Грасгофа, из-за ничтожного влияния естественной конвекции. При электромагнитном подводе энергии (при ГУ II рода) воздух выполняет задачу исключительно диффузионной среды. В таких условиях большие скорости воздуха становятся не только не нужны, а даже вредны, из-за потерь энергии с отработавшим сушильным агентом. Поэтому процессы сушки протекают при низких скоростях потока воздуха. В таких условиях показатели степени  $n$ ,  $g$  и  $q$  приближаются к 0. И структура критериального уравнения упрощается:

$$St_m = A \cdot (Pe_\delta)^m \cdot (Bu)^p \cdot (Ff)^k \quad (18)$$

Проведенный выше анализ схемы массопереноса показывает, что значение  $\beta_E$  определяется инерцией потока (массоперенос в условиях свободного движения отсутствует). В этих условиях скорость движения ленты может быть принята в качестве характеристического значения коэффициента массоотдачи, и служить для него масштабом отнесения.

<sup>21</sup> Appendix 1

Рассмотрим, как модернизировать уравнение (18) для задач сушки в неподвижном слое при электромагнитных источниках подвода энергии. в рамках такой задачи представлять в безразмерной форме интенсивность массоотдачи число Стантона не может. Необходимо использовать число Шервуда (табл. 6). Из (18) исключается число Пекле. Определяющую роль в сушке играет число энергетического действия. На первом этапе исследований обработку базы экспериментальных данных целесообразно проводить при отдельном учете влияния толщины обрабатываемого слоя, безразмерная форма которого ( $H$ ) может выглядеть отношением текущей толщины  $h$  к базовому значению (например, 1 м). Тогда:

$$Sh = A \cdot (Bu)^n \cdot (H)^m \cdot (Ff)^k \quad (19)$$

Константы в (18) и (19) определены при обработке массива данных, полученных при комплексных экспериментальных исследованиях. Эффект влияния вида продукта и электромагнитной энергии иллюстрируется кинетическими зависимостями (рис. 8).

Видно, что МВ поле при одинаковом значении удельной мощности требует в 2 раза меньше времени на процесс и характеризуется в 2 раза большими значениями скорости сушки. МВ поле при сушке до 11% требует в 1,5 – 2 раза меньше

затрат энергии на процесс, чем сушка в ИК поле, и характеризуется более низкими значениями температур сушки. Вид сырья не оказывает практического значения на интенсивность обезвоживания.

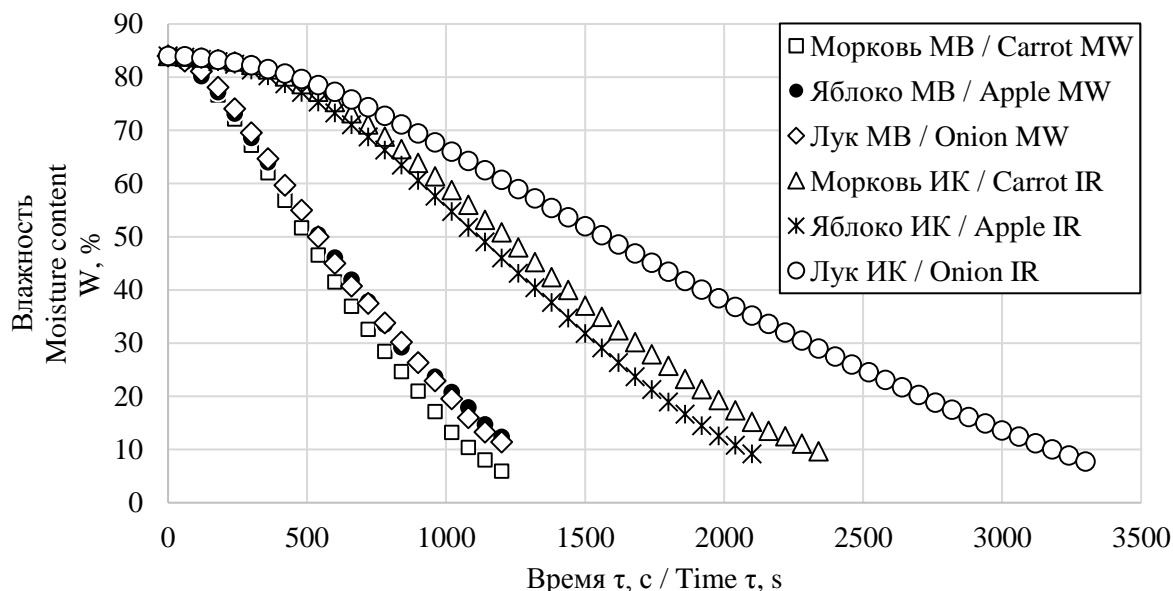


Рис. 7. Кинетика сушки в неподвижном слое.<sup>22</sup>

Итоговые критериальные модели имеют вид:

Таблица 7<sup>23</sup>.

Критериальные модели процессов сушки<sup>24</sup>

№	Вид энергии Energy type	Форма продукта Product form	Модель в обобщенных переменных Model in generalized variables
1	МВ / MW	Слайсы / Slices	$Sh = 7,1 \cdot 10^{-6} \cdot Bu^{7,18} \cdot H^{0,51}$ (20)
2	МВ / MW	Соломка / Sticks	$Sh = 2,1 \cdot 10^{-6} \cdot Bu^{3,49} \cdot H^{0,86}$ (21)

Модели (20) и (21) с погрешностью не более 10% описывают кинетику процесса сушки растительного сырья в форме слайсов и соломки. Модель учитывает влияние на интенсивность сушки ключевых факторов: мощности МВ поля и толщины слоя продукта. Определяющее влияние оказывает мощность излучения, которая учитывается в моделях числом энергетического действия (числом Bu).

При сушке в ИК поле константы  $n, m, k$  определяются формой продукта, а константа  $A$  учитывает конкретный вид сырья.

### ВЫВОДЫ

Современный этап развития пищевой индустрии характеризуется повышением спроса на качественные концентраты, отвечающие требованиям функционального питания. Одновременно необходимо снижать удельные затраты энергии в процессах обезвоживания и выполнять требования регламентов на экологическую безопасность. Наиболее энергоёмкими технологиями являются сушка, выпарка и экстрагирование.

Мировой опыт показывает, что перспективным путем совершенствования пищевых технологий являются аппараты с электромагнитными генераторами энергии. Однако теоретические основы создания такой техники практически отсутствуют.

<sup>22, 23, 24</sup> Appendix 1

Математические модели предложенных энерготехнологий представлены системами дифференциальных уравнений, устанавливающих нестационарные поля температур и концентраций, в которых действия электромагнитных генераторов энергии учитывается как равномерно распределенный по объему внутренний источник. Полученная краевая задача приведена к модели в обобщенных переменных, где результат электромагнитного воздействия учитывается числом энергетического действия.

Поставленная в работе задача исключить из технологии концентратов распылительную сушку решена за счет внедрения системы инновационных энерготехнологий, в основе которых разработанные авторами принципы адресной доставки энергии к элементам пищевого сырья. Задачи распылительной сушилки частично решаются в микроволновом экстракторе, частично в микроволновом выпарном аппарате.

Процессы экстрагирования, выпаривания и сушки в микроволновом поле прошли стендовые исследования и подтвердили справедливость выдвинутых в работе гипотез. В процессе экстрагирования потери целевых компонентов снижены с 5 до 0,2%, концентрация экстракта достигала 40%.

Процесс выпаривания в микроволновом поле позволяет повышать концентрацию целевых компонентов до 90 – 92%.

Система инновационных проектов не требует энергорасточительной распылительной сушилки и расходует энергии в 3,5 раз меньше, чем традиционные, а в пересчете на первичное топливо – в 2 раза меньше. При этом, практически все легколетучие компоненты сырья сохраняются в готовом продукте, тогда как в распылительной сушилке их теряется не менее 80%.

#### APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

<sup>1</sup>**Fig. 1.** Scheme of material and energy flows. (*a* – traditional technologies; *b* – innovative projects) (*E<sub>x</sub>* – extractor, *Q<sub>E</sub>* – energy for extraction, *G<sub>RM</sub>* – raw material mass, *C<sub>RM</sub>* – concentration of target components in raw material, *V<sub>E</sub>* – extractant flow, *G<sub>S</sub>* – sludge mass, *C<sub>S</sub>* – concentration of target components in sludge, *V<sub>S</sub>* – moisture content in sludge, *G<sub>E</sub>* – extract mass, *X<sub>E</sub>* – extract concentration, *E<sub>v</sub>* – evaporator, *Q<sub>V</sub>* – energy for evaporation, *G<sub>C</sub>* – concentrate mass, *X<sub>C</sub>* – solid matter content in

concentrate, *W<sub>RV</sub>* – reheat vapor flow, *SD* – spray dryer, *Q<sub>D</sub>* – energy for drying, *G<sub>P</sub>* – product mass, *X<sub>P</sub>* – product concentration, *W<sub>V</sub>* – vapor flow, *C<sub>P</sub>* – solid matter content in vapor, *HMU* – heat and mass utilizer, *G<sub>R</sub>* – solution mass, *X<sub>R</sub>* – solution concentration, *G<sub>OF</sub>* – outgoing air flow, *X<sub>OF</sub>* – solid matter content in outgoing air, *ME<sub>x</sub>* – microwave extractor, *N<sub>EX</sub>* – microwave extractor power, *ME<sub>v</sub>* – microwave evaporator, *N<sub>EV</sub>* – microwave evaporator power, *D<sub>C</sub>* – concentrate, *C<sub>RV</sub>* – content of non-aqueous components in reheat vapor, *CD* – condenser, *Q<sub>CD</sub>* – condensation energy, *G<sub>DT</sub>* – distillate mass, *X<sub>DT</sub>* – content of non-aqueous components in distillate.

<sup>2,3</sup>**Table 1.** Summary of the main operational parameters of traditional and innovative technologies.

<sup>4</sup>**Table 1 (Continued).**

<sup>5,6</sup>**Table 2.** Summary of the main energy parameters of traditional and innovative technologies (*Q<sub>T</sub>* – total energy, *N<sub>T</sub>* – total power).

<sup>7</sup>**Fig. 2.** Equivalent electrodiffusional scheme of adjacent processes of moisture transfer from the capillary system (*P<sub>V</sub>(τ)* – current values of vapor partial pressures, *R<sub>NC</sub>* – diffusional resistances in nanocapillaries, *R<sub>MC</sub>* – diffusional resistances in microcapillaries, *R<sub>MT</sub>* – diffusional resistances of mass transfer, *P<sub>VE</sub>* – vapor partial pressures in environment, *P<sub>OV</sub>(τ)* – overpressure in channel, *R<sub>H</sub>* – hydraulic resistance, *P<sub>O</sub>* – environmental pressure, *M<sub>Σ</sub>* – total quantity of removed moisture).

<sup>8</sup>**Fig. 3.** Electrodiffusional model of the traditional convective dryer (*R<sub>K</sub>* – initial diffusional resistance, *R<sub>C</sub>* – diffusional resistance of convective mass transfer, *W* – moisture).

<sup>9</sup>**Fig. 4.** Electrodiffusional model of the laminar barodiffusion (*R<sub>B</sub>* – barodiffusional resistance).

<sup>10</sup>**Fig. 5.** Process flow diagram of the belt dryer (*MW1, MW2, MW3* – microwave modules, *IR1, IR2, IR3* – infrared modules, *W<sub>1...6</sub>* – raw material moisture content, *G<sub>1...6</sub>* – raw material consumption, *t<sub>1...6</sub>* – raw material temperature, *W<sub>B1...B6</sub>* – air flow moisture content, *G<sub>B1...B6</sub>* – air flow consumption, *t<sub>B1...B6</sub>* – air flow temperature, *N<sub>E1...E6</sub>* – module power, *W<sub>P</sub>* – product moisture content, *G<sub>P</sub>* – product consumption, *t<sub>P</sub>* – product temperature).

<sup>11</sup>**Fig. 6.** Physical model of the drying process (*q<sub>MW</sub>* – microwave energy, *q<sub>IR</sub>* – infrared energy, *X, Z* – axes, *T<sub>1</sub> Z<sub>1</sub>...T<sub>5</sub> Z<sub>5</sub>* – temperature *T<sub>1</sub>...T<sub>5</sub>* at point *Z<sub>1</sub>...Z<sub>5</sub>* respectively).

<sup>12,13</sup>**Table 3.** Summary of boundary conditions of the drying model.

<sup>14,15</sup>**Table 4.** The main parameters of drying process in the electromagnetic field.

<sup>16</sup>**Table 4 (Continued).**

<sup>17,18</sup>**Table 5.** The dimensional matrix.

<sup>19,20</sup>**Table 6.** Combinations of parameters and similarity numbers.

<sup>21</sup>**Table 6 (Continued).**

<sup>22</sup>**Fig. 7.** Drying kinetics of fixed bed.

<sup>23,24</sup>**Table 7.** Criterial models of drying processes.

### Литература (References)

- [1] Milczarek R.R., Vilches A.M., Olsen C. W., Breksa A.P., Mackey B.E., Brandl M.T. Physical, microbial, and chemical quality of hot-air-dried persimmon (*Diospyros kaki*) chips during storage. *Journal of Food Quality*, 2020, vol. 2020, pp. 1-15. doi: 10.1155/2020/7413689
- [2] Nair P.K., Espinosa-Santana A.L., Guerrero-Martínez L., López-Ortiz A., Nair M.T.S. Prospects toward UV-blue filtered solar drying of agricultural farm produce using chemically deposited copper chalcogenide thin films on cellular polycarbonate. *Solar Energy*, 2020, vol. 203, pp. 123-135. doi: 10.1016/j.solener.2020.04.012
- [3] Liu W., Zhang M., Bhandari B. Nanotechnology – A shelf life extension strategy for fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, vol. 60, no. 10, pp. 1706-1721. doi: 10.1080/10408398.2019.1589415
- [4] Manzoor M.F., Ahmed Z., Ahmad N., Aadil R.M., Rahaman A., Roobab U., Rehman A., Siddique R., Zeng X.A., Siddeeg A. Novel processing techniques and spinach juice: Quality and safety improvements. *Journal of Food Science*, 2020, vol. 85, no. 4, pp. 1018-1026. doi: 10.1111/1750-3841.15107
- [5] Sabancı S., Icier, F. Effects of Vacuum Ohmic Evaporation on Some Quality Properties of Sour Cherry Juice Concentrates. *International Journal of Food Engineering*, 2019, vol. 15, no. 9, pp. 1-8. doi: 10.1515/ijfe-2019-0055
- [6] Bhattacharjee C., Saxena V.K., Dutta, S. Fruit juice processing using membrane technology: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, vol. 43, pp. 136-153. doi:10.1016/j.ifset.2017.08.002
- [7] Kumar S., Bathla A., Rani A., Singh S., Gautam P., Shahi NC., Joshi HC., Kumar V. Effect of microwave-assisted extraction (MAE) process on % extraction yield, phenolic compounds and antioxidants activity of natural extract from edible fiddleheads and MAE process optimization by using response surface methodology (RSM). *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 5689-5695. doi: 10.33263/BRIAC104.689695
- [8] Jiang YL., Ding YF., Wang DF., Deng Y., Zhao YY. io frequency-assisted enzymatic extraction of anthocyanins from *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz. flowers: Process optimization, structure, and bioactivity determination. *Industrial Crops and Products*, 2020, vol. 149, pp. 1-11. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112327
- [9] Kalyankar S.D., Deshmukh M.A., Chopde S.S., Khedkar C.D., Lule V.K., Deosarkar S.S. Milk Powder. *Encyclopedia of Food and Health*, 2016, pp. 724-728. doi: 10.1016/b978-0-12-384947-2.00465-7
- [10] Shishir M.R.I., Chen W. Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, vol. 65, pp. 49-67. doi: 10.1016/j.tifs.2017.05.006
- [11] Pattnaik M., Mishra H.N. Effect of microwave treatment on preparation of stable PUFA enriched vegetable oil powder and its influence on quality parameters. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, vol. 44, no. 4, pp. 1-15. doi: 10.1111/jfpp.14374
- [12] Samakradhamrongthai R., Thakeow P., Kopermsub P., Utama-ang N. Encapsulation of *Michelia alba* D.C. extract using spray drying and freeze drying and application on Thai dessert from rice flour. *International Journal of Food Engineering*, 2015, vol. 1, no. 2, pp. 77-85. doi: 10.18178/ijfe.1.2.77-85
- [13] Goodman E.M., Redmond J., Elia D., Harris S.R., Augustine M.B., Hand R.K. Practice Roles and Characteristics of Integrative and Functional Nutrition Registered Dietitian Nutritionists. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 2018, vol. 118, no. 12, pp. 2356-2369. doi: 10.1016/j.jand.2018.03.027
- [14] Almena A., Goode K.R., Bakalis S., Fryer P.J., Lopez-Quiroga E. Optimising food dehydration processes: energy-efficient drum-dryer operation. *Energy Procedia*, 2019, vol. 161, pp. 174-181. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.078
- [15] Yang X.-B., Zhao L., Goh K., Sui X.-L., Meng L.-H., Wang Z.-B. A phosphotungstic acid coupled silica-Nafion composite membrane with significantly enhanced ion selectivity for vanadium redox flow battery. *Journal of Energy Chemistry*, 2019, vol. 41, pp. 177-184.
- [16] Simić S., Orašanin G., Golubović D., Milić D., Batinić K. Consideration of Opportunities for the Optimization of Heat Energy Consumption in Industry and Energetics. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2019, vol. 76, pp. 494-503.
- [17] Khajehei F., Niakousari M., Eskandari M. H., Sarshar M. Production of pomegranate juice concentrate by complete block cryoconcentration process. *Journal of Food Process Engineering*, 2015, vol. 38, no. 5, pp. 488-498.

[18] Gukhman A.A. *Primenenie teorii podobiya k issledovaniyu protsesov teplo-massoobmena.*

*Protsesi perenosa v dvizhushcheysya srede.* 3rd ed. Moscow, 2010. 330 p.

**Сведения об авторах.**



**Бурдо Олег Григорьевич,** д.т.н., профессор. Сфера научных интересов: процессы теплообмена, нанотехнологии в пищевой промышленности, энергоэффективность г. Одесса, Украина  
E-mail: [poem.onaft@gmail.com](mailto:poem.onaft@gmail.com)



**Терзиев Сергей Георгиевич,** д.т.н. Сфера научных интересов: процессы теплообмена, экоиндустрия в АПК, экстрагирование г. Одесса, Украина  
E-mail: [poem.onaft@gmail.com](mailto:poem.onaft@gmail.com)



**Гаврилов Александр Викторович,** к.т.н. Сфера научных интересов: процессы теплообмена, процессы обезвоживания пищевых продуктов, энергоэффективность г. Симферополь  
E-mail: [tehfac@mail.ru](mailto:tehfac@mail.ru)



**Сиротюк Илья Вадимович,** аспирант. Сфера научных интересов: процессы теплообмена, экстрагирование, обезвоживание пищевых продуктов, энергоэффективность г. Одесса, Украина  
E-mail: [ilyxin09@gmail.com](mailto:ilyxin09@gmail.com)



**Щербич Максим Владимирович,** аспирант. Сфера научных интересов: экстрагирование, энергоэффективность. г. Одесса, Украина  
E-mail: [poem.onaft@gmail.com](mailto:poem.onaft@gmail.com)