

**Александр Викторович Гаврилов**

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Республика Крым, Россия  
tehfac@mail.ru

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Цель исследования – разработать методику энергоменеджмента для получения достоверных данных энергетической эффективности процесса обезвоживания растительного сырья. Предложен коэффициент энергопотребления ( $G_e$ ), с помощью которого рекомендуется проводить энергетический менеджмент эффективности процесса обезвоживания пищевого сырья. На него не оказывает влияние изменение цен на рынке энергоносителей. Данный коэффициент выражает зависимость удаленной влаги (величина на выходе) и расход топлива (величина на входе). Подтверждено, что технологии и оборудование, основанные на принципе воздействия микроволновых источников энергии, являются эффективными, как по энергетическим, так и по экономическим показателям, и имеют преимущество перед традиционными технологиями обезвоживания. Высокие значения коэффициента энергопотребления ( $G_e$ ) получены в микроволновой вакуумной выпарной установке. При сушке в условиях ЭМП процесс осуществляется по принципу объемного подведения энергии микроволновыми источниками внутрь продукта, а поверхностное удаление влаги осуществляется инфракрасными источниками энергии. При таком способе обезвоживания существенно сокращается продолжительность процесса и величина энергозатрат. При выпаривании в разработанной СВЧ вакуумной выпарной установке определено, что значения паропроизводительности в рабочей зоне установки четко коррелируются с уровнем подведенной мощности ЭМП. Кривые скорости на графических зависимостях постоянные и это подтверждает преимущества объемного подведения энергии микроволновыми источниками. Паропроизводительность увеличивается с ростом давления, вследствие снижения теплоты парообразования. При технологии обезвоживания пищевого сырья в микроволновой вакуумной выпарной установке получается готовый продукт с концентрацией сухого вещества 85–90 % и при низкой температуре 40 °С, что очень важно для термолабильных продуктов. Полученный продукт обладает хорошим внешним видом, консистенцией, не имеет постороннего запаха, не подгоревший, что наблюдается в классических выпарных установках. Это приводит к увеличению срока хранения и высокому качеству готового продукта. Предлагаемые технологии обезвоживания пищевых систем являются коммерчески привлекательными на рынке.

**Ключевые слова:** энергоменеджмент, пищевое сырье, энергоэффективность, сушка, выпарка, электромагнитное поле, обезвоживание, вакуум-выпарная установка

**Для цитирования:** Гаврилов А.В. Усовершенствование технологий обезвоживания растительного сырья // Вестник КрасГАУ. 2026. № 1. С. 273–282. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-1-273-282.

**Alexander Viktorovich Gavrilo**

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russia  
tehfac@mail.ru

## IMPROVEMENT OF PLANT RAW MATERIAL DEHYDRATION TECHNOLOGIES

*The objective of this study is to develop an energy management methodology for obtaining reliable data on the energy efficiency of plant material dehydration. An energy consumption coefficient ( $G_e$ ) is proposed for use in energy management of food raw material dehydration efficiency. It is unaffected by fluctuations in energy prices. This coefficient expresses the relationship between the removed moisture (out-*

put value) and fuel consumption (input value). It is confirmed that technologies and equipment based on the principle of microwave energy sources are efficient in both energy and economic indicators and offer advantages over traditional dehydration technologies. High values of the energy consumption coefficient ( $G_e$ ) were obtained in a microwave vacuum evaporator. When drying under EMF conditions, the process is carried out using the principle of volumetric energy supply by microwave sources to the product, while surface moisture is removed by infrared energy sources. This dehydration method significantly reduces the process time and energy consumption. During evaporation in the developed microwave vacuum evaporator, it was determined that the steam production values in the unit's working zone clearly correlate with the level of supplied microwave power. The velocity curves in the graphical dependencies are constant, confirming the advantages of volumetric energy supply by microwave sources. Steam production increases with increasing pressure due to the reduction in the heat of vaporization. Dehydration of food raw materials in a microwave vacuum evaporator produces a finished product with a dry matter concentration of 85–90 % and at a low temperature of 40 °C, which is essential for heat-sensitive products. The resulting product has a good appearance and consistency, is free of foreign odor, and is not burnt, which is common in traditional evaporators. This leads to an extended shelf life and high quality of the finished product. The proposed food system dehydration technologies are commercially attractive in the market.

**Keywords:** energy management, food raw materials, energy efficiency, drying, evaporation, electromagnetic field, dehydration, vacuum evaporation unit

**For citation:** Gavrilov AV. Improvement of plant raw material dehydration technologies. *Bulletin of KSAU*. 2026;(1):273-282. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-1-273-282.

**Введение.** Энергетически затратными технологиями в пищевой промышленности определены технологии обезвоживания растительного сырья [1, 2]. В основном это процессы извлечения влаги из продукта: выпарка и сушка. Также используют технологии криоконцентрирования [3–5].

Процесс обезвоживания сельскохозяйственного сырья в пищевой промышленности является одним из основных и самым энергоемким процессом, что оказывает существенное влияние на затраты энергии для получения готового продукта и показатель качества готового концентрата. Полезные затраты энергию на извлечение влаги при выпаривании составляют 75–85 %, а при сушке энергетический КПД составляет 40 % [2].

Наиболее распространены технологии с применением конвективных сушилок. Эти установки хорошо себя зарекомендовали, имеют высокую производительность, процесс массопереноса осуществляется вследствие увеличения расхода сушильного агента. Но при условии постоянного возрастания цены на энергоносители конвективная сушка не так экономически эффективна [6].

Известные технологии с применением конвективных сушилок имеют недостатки. Чтобы получить высокий коэффициент массопереноса, необходимо увеличивать скорость агента сушки, а при этом растут тепловые потери с отработанным агентом – около 25 % полезной энергии [7, 8]. Проблема эффективного применения энергии в процессах обезвоживания сырья остается актуальной и требует предложений по разработ-

ке новых энергоэффективных технологий и оборудования [9–11].

На сегодняшний момент в практике нет общепринятой оценки энергетической эффективности технологий обезвоживания. Применяемые на практике методы энергоменеджмента, оперирующие коэффициентом удельного потребления энергии ( $K_{\text{уд}}$ ) и ее расходом к 1 кг извлеченной влаги ( $G$ ), не позволяют получить точные значения. Необходимо предложить метод энергоменеджмента, который позволит сравнивать эффективность затраченной энергии технологий обезвоживания сырья. Предложенная методика основывается на необходимости проанализировать весь технологический процесс с позиции первоначального топлива и до получения готового продукта.

**Цель исследования** – разработать методику энергоменеджмента для получения достоверных данных энергетической эффективности процесса обезвоживания растительного сырья.

**Задачи:** разработать энергоэффективную технологию и оборудование (сушилки и выпарные установки) для обезвоживания растительного сырья с использованием микроволновых источников энергии и при этом получить высокие значения коэффициента массопереноса.

**Объекты и методы.** Проведение анализа затрат энергии в технологиях обезвоживания сырья – важная задача по их снижению. Классические теплотехнологии, включающие преобразование энергии от распределительных

сетей до конечного потребителя, приводят к понижению эффективности, а при выбросах теплоты – к возрастанию КПД. Используемые методики энергоэффективности [6–8] не позволяют оценить влияние этих преобразований. Известна методика оценки КПД энергетических потоков при иерархическом сравнении эффективности полезно используемой энергии в тепловых схемах технологического процесса. КПД потоков энергии процесса обезвоживания сырья выразим в виде зависимости значения энергии  $i$ -го элемента ( $E_i$ ) на выходе и ( $E_{i-1}$ ) на входе. Рассчитаем КПД при потерях энергии в  $i$ -м элементе ( $Q_i$ ):

$$\eta_i = \frac{E_i}{E_{i-1}} = \frac{E_{i-1} - Q_i}{E_{i-1}}. \quad (1)$$

Рассчитаем КПД энергетических потоков, движущихся в направлении отработанного теплоносителя:

$$\eta_{pi} = \frac{Q_{pi}}{E_m}, \quad (2)$$

где  $Q_{pi}$  – энергетические потери тепла;  $E_m$  – энергия от теплоносителя.

Суммарный показатель тепловой энергии процесса [11]

$$\eta = \frac{E_{np} + \sum Q_{pi}}{E_m} = \prod_{i=1}^n \eta_i + \frac{\sum Q_{pi}}{E_m}, \quad (3)$$

где  $E_{np}$  – полезно затрачиваемая энергия.

При проведении экспериментов и расчета энергоэффективности предлагаемого оборудования примем параметр, характеризующий источник энергии. Примем за источник топлива, тепловая энергия сгорания которого составляет 40 МДж/кг, т. е. 1 кг нефтяного эквивалента (кг н.э.) производит энергию в 40 МДж/кг н.э.

Для анализа энергоэффективности процессов обезвоживания предлагается новый коэффициент энергопотребления

$$G_3 = \frac{\mathcal{E}_n}{V} \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}_n$  – полезная энергия;  $V$  – отношение извлеченной влаги к кг н.э.

Данную методику будем применять при анализе энергоэффективности известных технологий переработки пищевого сырья.

**Результаты и их обсуждение.** Проведен комплексный анализ энергоэффективности молочного предприятия. Были рассмотрены расходы на технологический процесс за каждый месяц работы предприятия. На рисунке 1 представлены результаты расхода ресурсов и готового продукта молокоперерабатывающего предприятия. За 1 приняли максимальный расход энергоресурса и на получение готового продукта, были рассчитаны все показатели процесса.

Результаты по проведенному анализу (рис. 1) следующие:

1) расходы электрической энергии и водопроводной воды пропорциональны и адекватны с произведенным готовым продуктом;

2) расходы газа не равномерны, можно предположить, что зависят от затрат на отопление в зимние месяцы. Периодичность отопительного сезона имеет существенное воздействие на объем и распределение потребления газа, что является важным фактором для множества экономических, экологических и энергетических стратегий.

Данные анализа можно отнести и для других пищевых предприятий, но для производства сухого молока и пищевых концентратов будет трудно определить, как влияет отдельная технология обезвоживания пищевого сырья на общий баланс затрат энергии.

Метод энергоменеджмента заключается в анализе результатов полного цикла процесса – перехода энергии от первичного топлива до конечного потребителя.

В классической технологии обезвоживания пищевых систем проводят выпарку, а затем сушку. Микроволновая вакуумная выпарная установка реализует электрическую энергию, а классическая конвективная сушилка – тепловую энергию. По данной методике необходимо провести сравнение микроволновой вакуумной выпарной установки и конвективной сушилки и дать рекомендации.

Метод предполагает анализ эффективного расхода энергии топлива природного происхождения. Расход принят за 100. Расходы энергии в процессах обезвоживания пищевого сырья представлены в таблице 1.

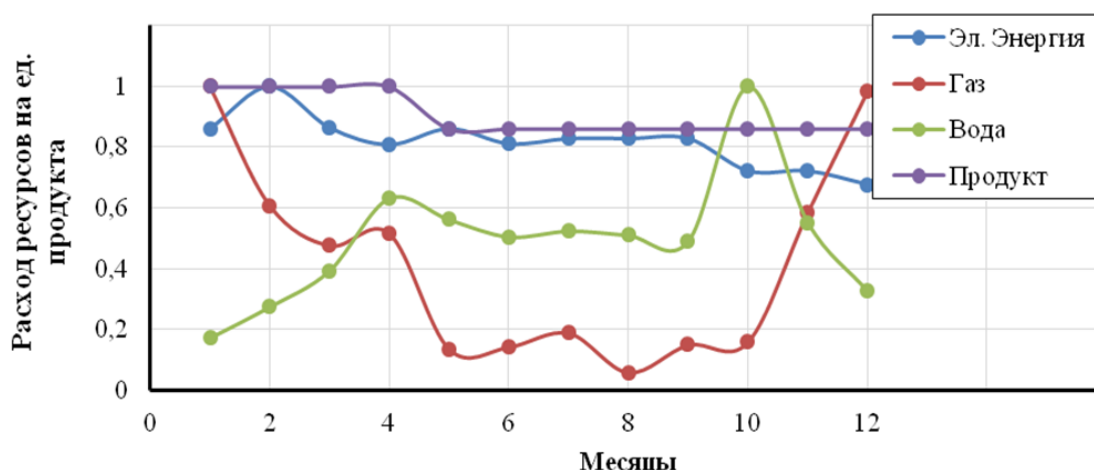


Рис. 1. Результаты расхода ресурсов и готового продукта  
молокоперерабатывающего предприятия  
Results of resource consumption and finished product of a dairy processing enterprise

Таблица 1

**Расходы энергии в процессах обезвоживания пищевого сырья**  
**Energy consumption in food dehydration processes**

Параметр процесса	Процесс обезвоживания	
	выпарка	сушка
Расход энергии на извлечение влаги теоретический (1 кг), МДж	2,3	2,3
Расход энергии на извлечение влаги реальный, МДж	1,5–2,8	4–7

Предлагаемый метод позволил оценить эффективность использования энергии в классических процессах обезвоживания и в процессах выпаривания и сушки в электромагнитном поле (ЭМП). Результаты оценки известного и предложенного коэффициентов энергетической эффективности технологий выпарки и сушки представлены в таблице 2.

Значение предложенного коэффициента энергоэффективности  $G_3$  в сушильных установках с ЭМП на сегодняшний момент составляет

$G_3 = 6$  кг влаги/кг н.э. В предлагаемой вакуум-выпарной установке используется принцип «бародиффузии», при котором в разы уменьшаются энергетические расходы. Во время проведения экспериментов из паровой камеры установки выходила смесь пара и воды. И это подтверждает возможность получения значений  $G_3 = 50$  кг влаги/кг н.э., при условии правильного регулирования параметров мощности ЭМП (магнетронов) в соответствии с требованиями качества пищевых продуктов.

Таблица 2

**Сравнительная оценка технологий обезвоживания по коэффициентам энергетической эффективности**  
**Comparative assessment of dehydration technologies based on energy efficiency coefficients**

Технология обезвоживания	Коэффициент удельного потребления энергии $K_{упл}$ , МДж/кг влаги	Удельный расход энергии $K_y$ , МДж/кг н.э.	Предложенный коэффициент энергопотребления $G_3$ , кг влаги/кг н.э.
Сушка классическая	4–8	4–10	1–3
Сушка в ЭМП	2–4	10–18	5–7
Выпаривание и сушка классическая	2,9	7–18	2–5
Выпаривание в ЭМП	2,6	10–18	4–8

Предложенная методика расчета показывает, что эффективной технологией обезвоживания является выпаривание в ЭМП. Если правильно сконструирована установка, заданы характеристики пищевого продукта и режимы процесса, то возможно достичь значение коэффициента энергопотребления  $G_3 = 50$  кг влаги/кг н.э. И при этом предлагаемая установка позволяет сохранить полезные вещества в сырье.

При расчетах будем использовать принятый параметр, характеризующий источник энергии: 1 кг нефтяного эквивалента (кг н.э.), вырабатывающий энергию в 40 МДж/кг н.э.

Эффективный расход энергии в классических процессах обезвоживания и в предлагаемом процессе выпаривания и сушки в электромагнитном поле приведен в виде схемы. Переход энергии от первичного топлива в полезную энергию, затрачиваемую на процесс обезвоживания, представлен на рисунке 2.

На рисунке 2 приведены сокращенные обозначения: ПГ – паровой генератор; К – калорифер паровой; СК – сушилka конвективная; ВВУ – вакуумная выпарная установка; ПТ – паровая турбина; ЭГ – электрический генератор; ГТ – газовая турбина; ЭВУ – электромагнитная вакуумная выпарная установка; КРК – криогенный концентратор. При расчете зададимся: КПД трансформации первичного топлива в электрическую энергию с паровыми турбинами – 32 %, с газовыми турбинами – 60, а КПД трансформации электроэнергии в СВЧ-камерах – 75 %.

Анализ позволяет сделать вывод, что технологии и оборудование, основанные на принципе

воздействия микроволновых источников энергии, являются эффективными, как по энергетическим, так и по экономическим показателям, и имеют преимущество перед традиционными технологиями обезвоживания. Конечно, капитальные затраты будут выше, чем на классическое оборудование, но в процессе производства они себя окупают. Актуальной задачей является расчет технологии и оборудования с микроволновыми источниками энергии.

Предложенная технология обезвоживания сырья основывается на следующих принципах:

1) переход в технологиях обезвоживания сырья на микроволновые источники энергии, которые способствуют четкому регулированию поданной энергии и действием ее направления. За счет этого будут снижены общие затраты энергии на процесс, которые включают энергопотери с отработанным агентом сушки и удаление пара из сырья;

2) граничные условия (ГУ) третьего рода в вакуум-выпарной установке заменены на ГУ 2-го рода, и осуществляется адресное подведение энергии к молекулам сырья, при котором полностью извлекается влага без образования пограничного слоя. Полученный продукт обладает хорошим внешним видом, консистенцией и не имеет постороннего запаха. Это приводит к увеличению срока хранения и высокому качеству готового продукта.

Предложенные принципы отображены в инновационных технологиях обезвоживания пищевого сырья (рис. 3).

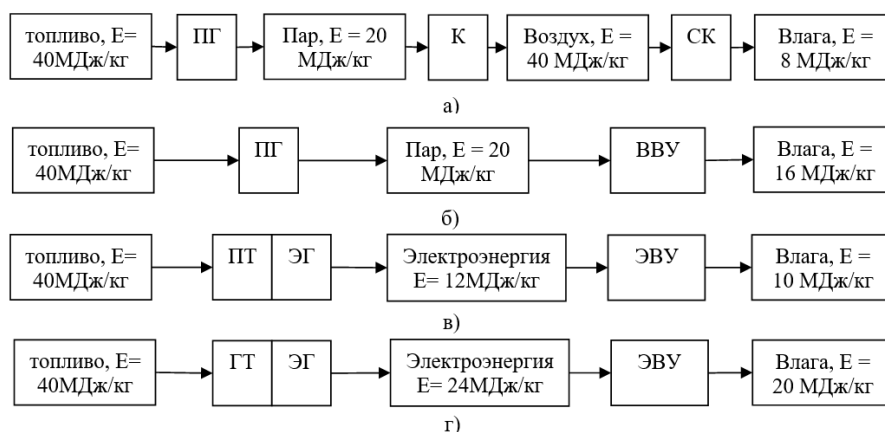


Рис. 2. Переход энергии первичного топлива в полезную энергию при технологиях обезвоживания:

а – классическая конвективная технология сушки; б – классическая технология выпарки;

в – микроволновая вакуумная выпарка; г – криоконцентрирование

Conversion of primary fuel energy into useful energy using dehydration technologies:

а – classical convective drying technology; б – classical evaporation technology;

в – microwave vacuum evaporation; г – cryoconcentration

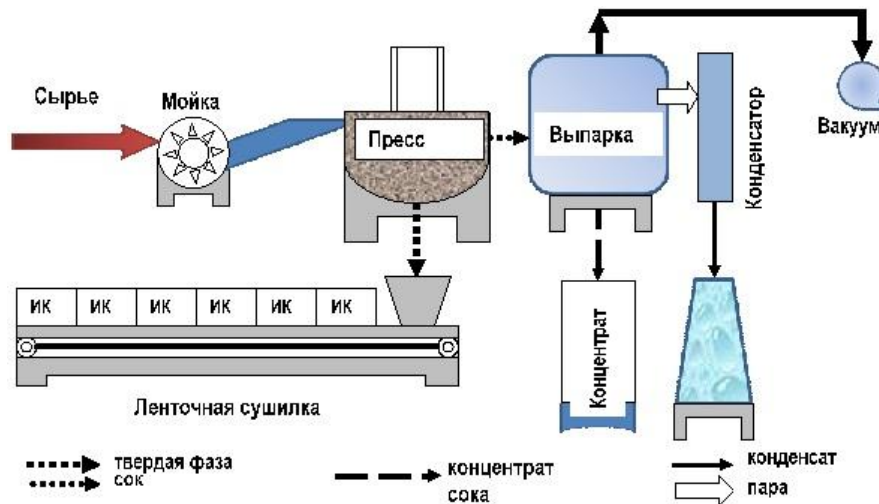


Рис. 3. Инновационные технологии обезвоживания пищевого сырья  
Innovative technologies for food dehydration

Ведущими установками в инновационной технологии являются микроволновая вакуумная выпарная установка и конвективная сушилка с ИК-диапазоном. Отпрессованный сок из пресса подается в вакуумную выпарную установку, а жмых на ленточную сушилку с ИК-диапазоном, где окончательно обезвоживается. Отработанный пар из выпарной установки через конденсатор идет на утилизацию или на повторное использование. Схема инновационных технологий обезвоживания сырья была основой для проведения экспериментов.

Для экспериментов выбраны яблоки и морковь. Построены графические зависимости сушки. Заданы следующие параметры: мощность

конвективной сушилки –  $1,88\text{--}11,25\text{ Вт/м}^2$  и время процесса – 60 мин.

Эксперименты проведены на сушилке с ИК-диапазоном. Подготовленный продукт размещали в сетчатых контейнерах. Масса продукта фиксировалась электронными весами, подключенными к измерительному комплексу. Информация автоматически регистрировалась, обрабатывалась и строилась в виде зависимостей. При проведении экспериментов определяли влияние мощности электромагнитных источников на удаление влаги и скорость сушки продукта. Температура измерялась постоянно.

Зависимости удаления влаги от времени процесса сушки для яблок и моркови в виде слайсов представлены на рисунке 4.

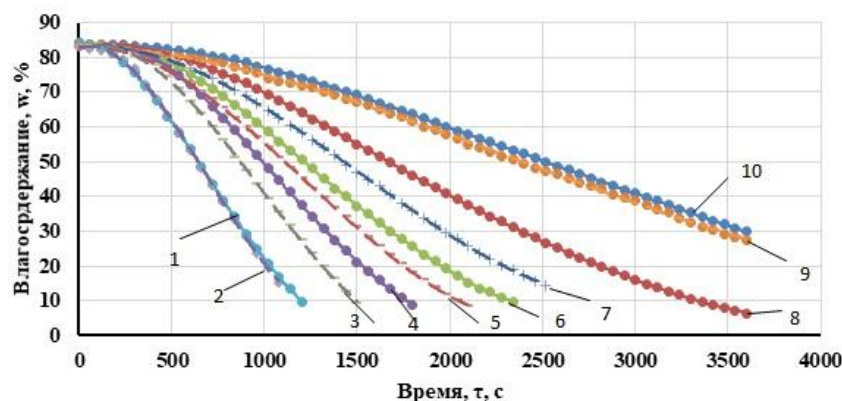


Рис. 4. Зависимости удаления влаги от времени процесса сушки:  
яблоко – на кривых 1, 3, 5, 7, 9; морковь – на кривых 2, 4, 6, 8, 10;  
мощность  $N$ ,  $\text{Вт/м}^2$ , на кривых: 1, 2 – 11,25; 3, 4 – 8,75; 5, 6 – 6; 7, 8 – 3,75; 9, 10 – 1,88

Dependence of moisture removal on the drying process time:  
apple – on curves 1, 3, 5, 7, 9; carrot – on curves 2, 4, 6, 8, 10;  
power  $N$ ,  $\text{W/m}^2$ , on curves: 1, 2 – 11,25; 3, 4 – 8,75; 5, 6 – 6; 7, 8 – 3,75; 9, 10 – 1,88

Из зависимостей (см. рис. 4) можно увидеть, что на скорость сушки непосредственное влияние оказывает мощность. Чем мощность выше, тем время процесса уменьшается. Анализ влияния подводимой мощности на изменение влажности продукта, показал, что время, затраченное на сушку до необходимой влажности в 11–15 %, составляет 1100–4600 с. Также измерялась температура, что очень важно в технологическом процессе переработки термолабильного сырья. Зависимости температуры от времени процесса сушки для яблок и моркови в ви-

де слайсов представлены на рисунке 5. При мощности в 1,88 кВт/м<sup>2</sup> температура яблок (рис. 5) не превышала 58 °С даже при длительной обработке сырья. При мощности в 3,75–11,25 кВт/м<sup>2</sup> температура яблок достигала 100 °С. Период сушки при таких температурах составил в среднем 5–10 мин.

Опыты по исследованию сушки сырья дают информацию, что процесс извлечения влаги происходит при стабильной скорости до влаго-содержания 20 % и линейно уменьшается при 10–20 %.

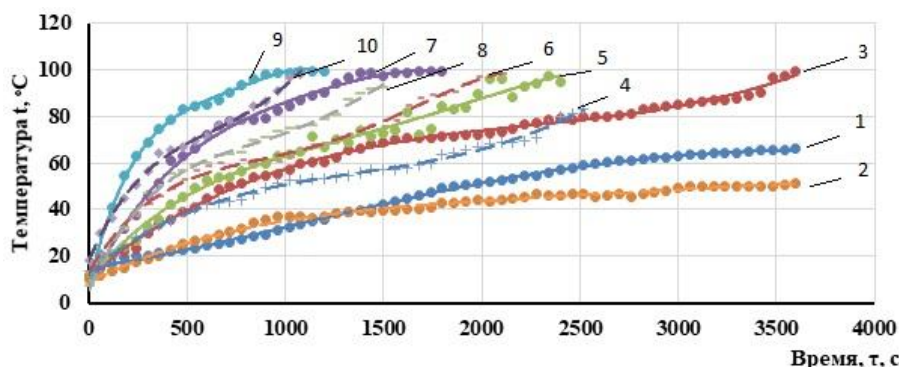


Рис. 5. Зависимости температуры от времени процесса сушки:  
яблоко – на кривых 1, 3, 5, 7, 9; морковь – на кривых 2, 4, 6, 8, 10;  
мощность  $N$ , Вт/м<sup>2</sup>, на кривых: 1, 2 – 1,88; 3, 4 – 3,75; 5, 6 – 6; 7, 8 – 8,75; 9, 10 – 11,25  
Temperature dependence on the drying process time:  
apple – on curves 1, 3, 5, 7, 9; carrot – on curves 2, 4, 6, 8, 10;  
power  $N$ , W/m<sup>2</sup>, on curves: 1, 2 – 1.88; 3, 4 – 3.75; 5, 6 – 6; 7, 8 – 8.75; 9, 10 – 11.25

Для технологий обезвоживания, на примере сушки, с электромагнитными источниками энергии предложенный коэффициент энергопотребления  $G_3$  выше, чем в традиционных процессах. Потому что извлечение влаги происходит туманом и, конечно, электромагнитные источники положительно воздействуют на процесс. При классической конвективной сушке сушильный агент передает энергию влаге на поверхности продукта, а потом влаге внутри капилляров, и в результате выходит влажный пар. При сушке в ЭМП ИК-диапазона электромагнитное поле последовательно воздействует на влажный продукт с разной частотой, происходит извлечение части жидкости из сырья за счет бародиффузионных и конвективных движущих сил процесса. Объемный подвод энергии осуществляется микроволновыми источниками, а поверхностный – инфракрасными. При таком способе обезвоживания существенно сокращается продолжительность процесса и величина энергозатрат.

При микроволновой сушке за счет бародиффузии из капилляров выходит влажный пар и

капли жидкости. И чем капель жидкости выходит больше, тем меньше затраты энергии. Такой состав из влажного пара и капель жидкости отражает затраченную энергию на процесс.

Были проведены экспериментальные исследования микроволновой вакуумной выпарной установки. Объектами исследований были различные пищевые системы, классифицированные на жидкие гомо- и гетерогенные по типу растворителя: 1) на водной основе – соки яблочный, эхинацеи и свекольный; 2) на основе спирта этилового – вино (10 % спирта) и экстракт кофейного масла; 3) на основе ацетона – экстракт масла виноградных косточек. Ацетоно-содержащие пищевые системы были исследованы для расширения возможностей получения эмпирических уравнений, учитывающих влияние теплоты фазового перехода. Экспериментальные исследования проведены в различных диапазонах варьируемых параметров. Характеристика объектов исследования представлена в таблице 3.

### Характеристика объектов исследования Characteristics of research objects

Объект исследования	Растворитель	Концентрация, %	
		сырья	продукта
Сок яблочный	Вода	11,6	45,8
Сок эхинацеи	Вода	13,5	36,3
Сок свекольный	Вода	12,2	81,3
Вино	Вода/этанол	5,8	62,3
Экстракт кофейного масла	Этанол	6	77,5
Кофейный шлам	Этанол	56	78,6
Экстракт масла виноградных косточек	Ацетон	8,6	56,4

Стенд для проведения опытов был оборудован экстракционной камерой, измерительно-вычислительным комплексом и системой управления процессом, системой охлаждения, вакуум-насосом, манометром и электронными весами для измерения конденсата.

Эксперименты по исследованию влияния давления на паропроизводительность проводились при постоянной мощности электромагнит-

ного поля 200 Вт и одинаковом объеме продукта. Давление изменялось в диапазоне 0,01–0,02 МПа. Исследования зависимости скорости выпаривания для различных пищевых систем показали расслоение результатов по типу растворителя.

Скорости выпаривания от концентрации различных пищевых систем отображены на рисунке 6.

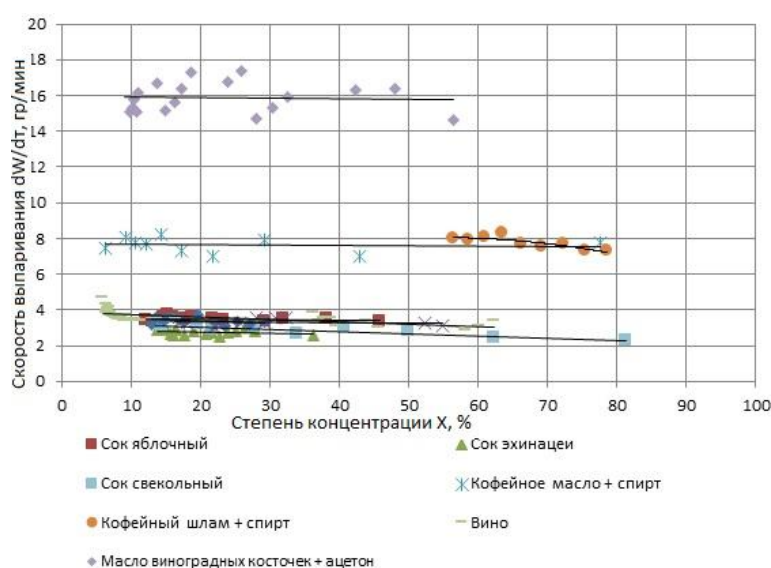


Рис. 6. Зависимости скорости выпаривания от концентрации пищевых систем  
Dependence of evaporation rate on the concentration of food systems

Скорость выпаривания зависит не от концентрации влаги в сырье, а от теплоты фазового перехода растворителя. И этим подтверждается классификация объектов по виду растворителя. На рисунке 6 скорости выпаривания сгруппировались в зависимости от растворителя в пищевой системе: водосодержащие, спиртосодержащие и ацетонсодержащие. Данный фактор в процессе обезвоживания пищевого сырья имеет огромное значение. Результаты опытов показа-

ли, что влагоизвлечение в системах, содержащих спирт, в 2,0–2,5 раза выше, чем в системах на водной основе. При этом ацетонсодержащие растворы в 5 раз превышают скорость влагоизвлечения водорастворимых систем. Давление в системе не превышало 10 кПа, что позволило обеспечить процесс выпаривания при минимальной подводимой мощности электромагнитного поля и, соответственно, при относительно низкой температуре 40 °С. В результате

были получены опытные образцы готового продукта, обладающего более высоким качеством, чем в классических выпарных установках. Конечная концентрация сухих веществ 85–90 °brix, а это на 25–30 % превосходит традиционное оборудование.

Планируется обработать полученную базу экспериментальных данных по всем пищевым системам и вывести одну модель в критериальном виде безразмерных переменных для описания процесса выпаривания с помощью микроволновых источников энергии для всех изученных пищевых систем.

**Заключение.** Предложен коэффициент энергопотребления ( $G_{\text{э}}$ ), с помощью которого рекомендуется проводить энергетический менеджмент эффективности процесса обезвоживания пищевого сырья. На него не оказывает влияние изменение цен на рынке энергоносителей. Данный коэффициент выражает зависимость удаленной влаги (величина на выходе) и расход топлива (величина на входе).

Подтверждено, что технологии и оборудование, основанные на принципе воздействия микроволновых источников энергии, являются эффективными как по энергетическим, так и по экономическим показателям, и имеют преимущество перед традиционными технологиями обезвоживания. Высокие значения коэффициента энергопотребления ( $G_{\text{э}}$ ) получены в микроволновой вакуумной выпарной установке.

При сушке в условиях ЭМП процесс осуществляется по принципу объемного подведения энергии микроволновыми источниками внутрь

продукта, а поверхностное удаление влаги осуществляется инфракрасными источниками энергии. При таком способе обезвоживания существенно сокращается продолжительность процесса и величина энергозатрат.

При выпаривании в разработанной СВЧ вакуумной выпарной установке определено, что значения паропроизводительности в рабочей зоне установки четко коррелируются с уровнем подведенной мощности ЭМП. Кривые скорости на графических зависимостях постоянные, и это подтверждает преимущества объемного подведения энергии микроволновыми источниками. Установлено, что паропроизводительность увеличивается с ростом давления вследствие снижения теплоты парообразования.

При технологии обезвоживания пищевого сырья в микроволновой вакуумной выпарной установке получается готовый продукт с концентрацией сухого вещества 85–90 % и при низкой температуре 40 °С, что очень важно для термолабильных продуктов. Полученный продукт обладает хорошим внешним видом, консистенцией, не имеет постороннего запаха, не подгоревший, что наблюдается в классических выпарных установках. Это приводит к увеличению срока хранения и высокому качеству готового продукта.

Предлагаемые технологии обезвоживания пищевых систем являются коммерчески привлекательными на рынке.

Автор признателен сотрудникам кафедры за помощь.

#### Список источников

1. Burdo O.G., Bandura V.N., Levtrinskaya Y.O. Electrotechnologies of targeted energy delivery in the processing of food raw materials // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 54, N 2. P. 210–218. DOI: 10.3103/S1068375518020047.
2. Clapp J., Newell P., Brent Z.W. The global political economy of climate change, agriculture and food systems // *The Journal of Peasant Studies*. 2018. Vol. 45, N 1. P. 80–88. DOI: 10.1080/03066150.2017.1381602.
3. Kai L., Zhao Z., Li H., et al. Microwave-induced vapor-liquid mass transfer separation technology – full of breakthrough opportunities in electrified chemical processes // *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2023. Art. 100890. DOI: 10.1016/j.coche.2022.100890
4. Cüneyt D. Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration // *Journal of microwave power and electromagnetic energy*. 2021. Vol. 55, N 3. P. 175–196. DOI: 10.1080/08327823.2021.1952837.
5. Kumar C., Karim M.A. Microwave-convective drying of food materials: A critical review // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2019. Vol. 59, N 3. P. 379–394. DOI: 10.1080/10408398.2017.1373269.
6. Balin B.E., Akan D.M. EKC hypothesis and the effect of innovation: A panel data analysis // *Journal of Business Economics and Finance*. 2015. Vol. 4, N 1. P. 81–91. DOI: 10.17261/Pressacademia.201519952.

7. Hosovskyi R. Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks // *Chemistry & Chemical technology*. 2016. Vol. 10, N 4. P. 459–464. DOI: 10.23939/chcht10.04.459.
8. Sabarez H.T. Thermal drying of foods // *Fruit Preservation*. Springer, New York, № 2018. P. 181–210. DOI: 10.1007/978-1-4939-3311-2\_7.
9. Prosekov A.Y., Ivanova S.A. Food security: The challenge of the present // *Geoforum*. 2018. Vol. 91. P. 73–77. DOI: 10.1016/j.geoforum.2018.02.030.
10. Govindan K. Sustainable consumption and production in the food supply chain: A conceptual framework // *International Journal of Production Economics*. 2018. Vol. 195. P. 419–431. DOI: 10.1016/j.ijpe.2017.03.003.
11. Monteiro R.L. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices // *Journal of food engineering*. 2018. Vol. 232. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015.

### References

1. Burdo OG, Bandura VN, Levtrinskaya YO. Electrotechnologies of targeted energy delivery in the processing of food raw materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018;54(2):210-218. DOI: 10.3103/S1068375518020047.
2. Clapp J, Newell P, Brent ZW. The global political economy of climate change, agriculture and food systems. *The Journal of Peasant Studies*. 2018;45(1):80-88. DOI: 10.1080/03066150.2017.1381602.
3. Kai L, Zhao Z, Li H, et al. Microwave-induced vapor-liquid mass transfer separation technology – full of breakthrough opportunities in electrified chemical processes. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2023;100890. DOI: 10.1016/j.coche.2022.100890
4. Cüneyt D. Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*. 2021;55(3):175-196. DOI: 10.1080/08327823.2021.1952837.
5. Kumar C, Karim MA. Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2019;59(3): 379-394. DOI: 10.1080/10408398.2017.1373269.
6. Balin BE, Akan DM. EKC hypothesis and the effect of innovation: A panel data analysis. *Journal of Business Economics and Finance*. 2015;4(1):81-91. DOI: 10.17261/Pressacademia.201519952.
7. Hosovskyi R. Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks. *Chemistry & Chemical technology*. 2016;1(4):459-464. DOI: 10.23939/chcht10.04.459.
8. Sabarez HT. Thermal drying of foods. *Fruit Preservation*. Springer, New York, № 2018. P. 181–210. DOI: 10.1007/978-1-4939-3311-2\_7.
9. Prosekov AY, Ivanova SA. Food security: The challenge of the present. *Geoforum*. 2018;91:73-77. DOI: 10.1016/j.geoforum.2018.02.030.
10. Govindan K. Sustainable consumption and production in the food supply chain: A conceptual framework. *International Journal of Production Economics*. 2018;195:419-431. DOI: 10.1016/j.ijpe.2017.03.003.
11. Monteiro RL. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. *Journal of food engineering*. 2018;232:1-10. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015.

Статья принята к публикации 15.10.2025 / The article accepted for publication 15.10.2025.

Информация об авторах:

**Александр Викторович Гаврилов**, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, кандидат технических наук, доцент

Information about the authors:

**Alexander Viktorovich Gavrilo**v, Associate Professor, Department of Technology and Equipment for Livestock Production and Processing, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

