

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА /
POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 664.8.022.1

DOI: 10.34677/1728-7936-2019-5-31-39

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

ГАВРИЛОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент

E-mail: tehfac@mail.ru

Академия биоресурсов и природопользования Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского; 295492, пос. Аграрное, АбиП КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Республика Крым

Анализ многочисленных научных работ показывает, что интенсивное развитие инновационных образцов техники опережает уровень развития методологических основ энергетического менеджмента. Отсутствуют чёткие сравнения энергоэффективности электротехнологий и теплотехнологий, поскольку используются различные виды энергии; отсутствуют объективные показатели эффективности использования энергии в различных технологиях обезвоживания сырья. В данном исследовании предложена методология, в основе которой положена гипотеза, что объективные результаты при сравнении эффективности использования энергии при переработке сырья можно получить на основе системного анализа всей цепи конверсии энергии от топлива до готового продукта. Цель работы – экспериментально доказать объективность данной гипотезы. Предлагается использовать показатель доли энергии топлива в готовом продукте и количество удаленной влаги при сжигании 1 кг топлива. Такой показатель не зависит от колебания цен на энергоносители, которые могут изменяться и отличаться для разных стран. Выполнен анализ тепловых балансов сушильной и выпарной установок. Показано, что при одинаковых технических задачах неоптимизированная выпарка в разы эффективней оптимизированного процесса сушки. Приведены структурные модели конверсии энергии при комбинированных процессах получения концентрированных пищевых продуктов. Рассчитаны эффективность использования энергии топлива в традиционных схемах сушки, выпарки, криоконцентрирования. Проведено сравнение этих параметров с данными для инновационных образцов техники, разработанных автором. Показано, что разработанные автором выпарные установки не уступают по эффективности традиционным и позволяют получать концентраты до 90 brix. Разработанные микроволновые сушилки и установки блочного вымораживания существенно превышают эффективность аналогов – позволяют удалить до 6 и до 100 кг влаги, в то время как традиционные сушилки для топлива с нефтяным эквивалентом 40 МДж на 1 кг могут удалить не более 3 кг влаги, криоконцентраторы – 20 кг.

Ключевые слова: энергетический менеджмент, пищевые производства, энергоэффективность, сушка, криоконцентрирование, микроволновое поле, обезвоживание, пищевые концентраты.

Формат цитирования: Гаврилов А.В. Анализ современных энерготехнологий переработки растительного сырья // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. № 5(93). С. 31-39. DOI: 10.34677/1728-7936-2019-5-31-39.

ENERGY SOURCES IN INNOVATIVE ENERGY TECHNOLOGIES OF VEGETABLE PROCESSING

ALEKSANDR V. GAVRILOV, PhD (Eng), Associate Professor

E-mail: tehfac@mail.ru

Academy of Life and Environmental Sciences, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, 295492, the Crimea Republic, Simferopol, Agrarnoye

The analysis of numerous scientific works shows that the intensive development of innovative types of technology exceeds the development of the methodological foundations of power engineering management. There are no clear comparisons of the energy efficiency of electrical technologies and heat technologies, since different types of energy are used; there are no objective indicators of energy efficiency in various technologies of dehydration of raw materials. The present study proposes a methodology based on the hypothesis that when comparing energy efficiency in the processing of raw materials, objective results

can be obtained through a system analysis of the entire energy conversion chain from fuel to a finished product. The research purpose is to experimentally prove the validity of this hypothesis. The author suggests using the indicator of the share of fuel energy in the finished product and the amount of moisture removed when burning 1 kg of fuel. This figure does not depend on fluctuations in energy prices, which may vary for different countries. The paper presents an heat balance analysis of drying and evaporation plants. It is shown that with the same technical tasks, non-optimized evaporation is several times more efficient than the optimized drying process. The authors present structural models of energy conversion in combined processes for the production of concentrated food products. The energy efficiency of using fuel in conventional drying, evaporation, and cryoconcentration techniques has been calculated. The obtained parameters are compared with the data for innovative models of machines developed by the author. It is shown that the evaporating installations developed by the author are not inferior in efficiency to conventional ones, and allow obtaining concentrates up to 90 brix. The developed microwave dryers and unit freeze installations significantly exceed the efficiency of their counterparts, allowing to withdraw, respectively, up to 6 and 100 kg of moisture, while conventional dryers for fuels with an oil equivalent of 40 MJ per 1 kg can remove no more than 3 kg of moisture, and cryoconcentrators – 20 kg.

Key words: energy management, food production, energy efficiency, drying, cryoconcentration, microwave field, dehydration, food concentrates.

For citation: Gavrilov A.V. Energy sources in innovative energy technologies of vegetable processing. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019; 5(93): 31-39. DOI: 10.34677/1728-7936-2019-5-31-39 (In Rus.).

Введение. Серьезный анализ энергоэкологических проблем в индустриально развитых странах проводится регулярно, собираются и систематизируются данные как об отдельных промышленных объектах [1-6], так и о состоянии окружающей среды в целом [2, 7].

Наиболее энергоёмкими в пищевых производствах являются технологии обезвоживания пищевого сырья [10-12]. Преимущественно используются технологии перевода влаги в пар (выпарка, сушка). В последнее время растёт интерес к криоконцентрированию [13].

Именно процесс обезвоживания пищевых растворов, сырья растительного и животного происхождения в значительной степени определяет и качество готового продукта, и затраты на расходы энергии. Обезвоживание является ключевым процессом во многих пищевых технологиях. Применяются два принципа: выпаривание и сушка. Но затраты энергии на удаление единицы влаги в этих процессах оказываются существенно разными. Если энергетический КПД самого несовершенного процесса выпарки составляет 85%, то лучшие сушильные технологии не превышают 40% [10].

Наибольшее распространение в мире получили конвективные сушилки. Это высокопроизводительные установки, интенсификация процессов массопереноса в которых достигается за счёт повышения расхода сушильного агента. Но такой подход оправдан только в условиях низких цен на топливо. А в условиях стабильного роста цен на энергоносители, в условиях энергетического кризиса принципы конвективной сушки не эффективны [11].

Традиционные технологии конвективной сушки сырья столкнулись с серьёзными противоречиями. Задача достижения высоких значений коэффициентов массопереноса решается путём увеличения скорости (расхода) сушильного агента. Однако повышение расхода приводит к пропорциональному росту потерь теплоты в окружающую среду. Именно с отработавшим сушильным агентом в окружающую среду теряется 25% энергии топлива. При этом, при достаточно широких исследованиях кинетики процессов выпаривания [14], сушки и вопросов моделирования [15], проблемы энергетике процессов обезвоживания, особенно для инновационных технологий, исследуются редко.

Цель исследований. Самостоятельной серьёзной проблемой является методология сравнения энергоэффективности

электротехнологий и теплотехнологий, поскольку используются различные виды энергии; отсутствуют объективные показатели эффективности использования энергии в различных технологиях обезвоживании сырья. Эксергетические методы удобны только для термодинамического анализа, экономические показатели для условий развивающихся стран – не стабильны. Известные методы энергетического менеджмента, которые оперируют коэффициентом удельного энергопотребления (КУЭ) и удельным расходом энергии на 1 кг удаленной влаги (J), не всегда дают корректные результаты. Поэтому актуален вопрос развития научных основ и методов энергетического менеджмента для объективного сравнения энергетической эффективности технологий. Строгих методов оценки энергетической эффективности, особенно инновационных энерготехнологий, нет. В основе предлагаемой методологии положена следующая гипотеза: «Объективные результаты при сравнении эффективности использования энергии при переработке сырья можно получить на основе системного анализа всей цепи конверсии энергии от топлива до готового продукта».

Цель работы – дать развитие методологии энергетического менеджмента на основе положения, что объективные результаты при сравнении эффективности использования энергии при переработке сырья можно получить на основе системного анализа всей цепи конверсии энергии от топлива до готового продукта. Обосновать эффективность инновационных технологий обезвоживания растительного сырья на основе электромагнитных источников энергии.

Материал и методы. Системный анализ энерготехнологий является эффективным инструментом снижения затрат энергии в производстве. Современные промышленные теплотехнологии – это сложные системы, которые включают преобразователи энергии, распределительные сети и потребителей. Причём, преобразователи тепловой энергии на прямом потоке энергии приводят к снижению энергетической эффективности схемы, а на потоках выбросов тепловой энергии, на «реверсных потоках» – к повышению энергетического КПД. Традиционные методы энергетического мониторинга не дают рекомендаций по количественной оценке влияния «реверсных потоков» [16]. Известно предложение развития теоретических основ энергомониторинга, разработка метода оценки энергетических КПД «реверсных потоков»

иерархической оценки эффективности использования энергии в теплотехнологической схеме [17]. Последовательно энергетические КПД отдельных элементов системы определяются отношением величины энергии на выходе (\mathcal{E}_i) из i -го анализируемого элемента и значения на входе (\mathcal{E}_{i-1}). Разница этих потоков определяет потери энергии (Q_i) в i -м элементе:

$$\eta_i = \frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_{i-1}} = \frac{\mathcal{E}_{i-1} - Q_i}{\mathcal{E}_{i-1}}. \quad (1)$$

В случае «реверсных» потоков энергии, потоков по пути отработавшего теплоносителя, рассчитываются КПД реверсных элементов:

$$\eta_{pi} = \frac{Q_{pi}}{\mathcal{E}_T}, \quad (2)$$

где Q_{pi} – потери энергии теплоносителя, Дж; \mathcal{E}_T – энергия теплоносителя, Дж.

Итоговый тепловой показатель системы определяется [17]:

$$\eta = \frac{\mathcal{E}_{np} + \sum_i Q_{pi}}{\mathcal{E}_T} = \prod_{i=1}^n \eta_i + \frac{\sum_i Q_{pi}}{\mathcal{E}_T}, \quad (3)$$

где \mathcal{E}_{np} – полезная энергия, Дж.

На основе предложенной гипотезы предлагается оперировать в расчётах базовыми характеристиками источника энергии, например, топлива с теплотой сгорания 40 МДж/кг, то есть 1 кг нефтяного эквивалента (кг н.э.) выделяет энергию в 40 МДж/кг н.э.

Для проведения анализа предлагается ввести показатель эффективности использования энергии топлива

$$d_0 = \frac{E_u}{O},$$

где E_u – доля в процессе полезной энергии; O – соотношение кг удаленной влаги к кг н.э.

Такая методология энергетического менеджмента использована при исследовании типичных предприятий и технологий производства пищевых продуктов.

Результаты и обсуждение. Выполнен энергетический аудит пищевых предприятий, которые специализируются на переработке растительного сырья. Опыт показывает, что картины месячных расходов ресурсов типичны. На рисунке 1 в безразмерной форме представлена картина месячного расхода ресурсов и выпуска продукции молочного завода. За 1 принято максимальное значение ресурса и продукта. Относительно максимального расчитаны все текущие значения.

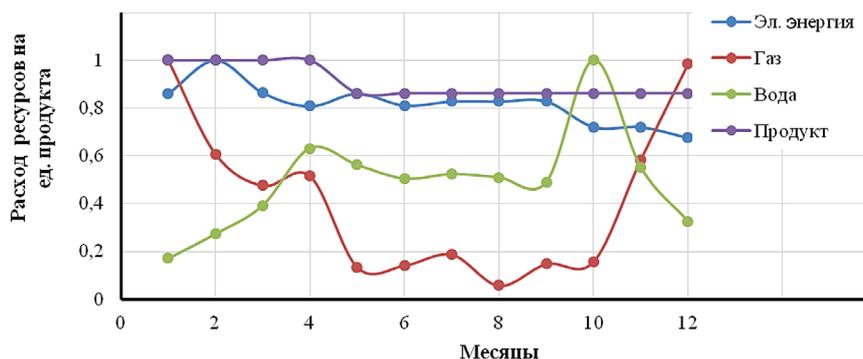


Рис. 1. Результаты энергетического мониторинга молочного завода

Fig. 1. Results of energy monitoring of a dairy plant

Анализ данных рисунка 1 даёт возможность сделать такие выводы:

- расход электроэнергии и воды удовлетворительно коррелируется с объёмом выпуска продукции;
- объём потребленного газа существенно зависит от отопительного сезона.

Такие положения справедливы для большинства пищевых производств. Однако для производств, которые выпускают сухое молоко, пищевые концентраты и т.п., при энергетических исследованиях возникает серьёзная проблема выявить конкретное влияние каждой технологии обезвоживания в общем балансе.

Методология энергетического менеджмента основана на системном анализе всей технологической цепочки «первичное топливо – его трансформации в соответствующий вид энергии – распределительная сеть – потребитель».

Традиционно для получения концентрированных растворов после выпарки проводят сушку. В результате развития низкотемпературных технологий разделения

пищевых жидкостей удельные затраты энергии (J) криотехнологий (КТ1) на выделение 1 кг льда из раствора достигли 1,1 МДж [17]. Это значительно меньше, чем даже у 7-ми ступенчатых вакуум-выпарных установок. Разработка вымораживающих установок блочного типа (КТ2) обеспечила достижение параметра J до 0,7 МДж на 1 кг льда. В установках третьего и четвертого поколения этот параметр имел значения, соответственно, 0,4 и 0,3 МДж на 1 кг льда [17].

Установка блочного вымораживания и микроволновой выпарной аппарат используют электрическую энергию. А традиционные аппараты для концентрирования и сушки – другие виды энергии. Предложенная методология позволяет провести объективное сравнение для таких схем.

Анализ сводится к эффективности использования энергии первичного топлива органического происхождения. Расход топлива принят равным 100.

Энергетика принципов приводится в таблице 1.

Предложенная методология принята при оценке эффективности использования энергии в традиционных

технологиях сушки и выпаривания и предложенных методов сушки и выпаривания в электромагнитном поле (ЭМП) [ЭОМ]. Выполнено сравнение традиционных

принципов криоконцентрирования [13] и разработанного аппарата блочного вымораживания [17]. Результаты анализа представлены в таблице 2.

Таблица 1

Энергоемкость технологий обезвоживания

Table 1

Energy intensity of dehydration technologies

Параметры	Процесс		
	Парообразование		Кристаллизация (льдообразование)
	выпарка	сушка	
Теоретические затраты энергии на удаление 1 кг влаги, МДж	2,3	2,3	0,33
Действительные затраты энергии на удаление 1 кг влаги, МДж	1,5...2,8	4...7	1,15

Значение универсального показателя $d_0 = 6$ кг в/кг н.э. в настоящее время достигнуто при испытаниях сушильных аппаратов с ЭМП. Визуально отмечено, что из камеры выходит пароводяная смесь [11]. Аппараты

реализуют режим бародиффузии, а это существенно снижает расход энергии. Реально можно достичь значений $d_0 = 50$ кг в/кг н.э. при четком согласовании мощности ЭМП генераторов с характеристиками пищевого сырья.

Таблица 2

Сравнение традиционных и универсального показателей энергоэффективности различных технологий обезвоживания

Table 2

Comparison of conventional and universal energy efficiency indicators of various dehydration technologies

Энерготехнология	КУЭ, МДж/кг влаги	J, МДж/кг н.э.	d_0 , кг в/кг н.э.
Сушка традиционная	4...7	4...9	1...3
Сушка в ЭМП	2...4	10...20	5...6
Выпарка + сушка традиционная	2,8	8...20	3...6
Выпарка в ЭМП	2,7	10...20	3,5...7,5
Криоконцентрирование	1,1	24	20...21
Блочное вымораживание	0,3...0,7	35	50...100

По предложенной методике оценки в энергетическом аспекте наиболее эффективны вымораживающие установки. Объясняется такой феномен тем, что физическая энергия кристаллизации в 7 раз меньше, чем выпаривания. В установках блочного вымораживания используется возможность возврата в холодильный цикл энергии льда (рециклинг льда) [17]. При правильном согласовании конструкции аппарата, характеристик раствора и режимов вымораживания значения $d_0 = 100$ кг в/кг н.э. являются реальными. Более того, установки блочного вымораживания гарантируют сохранение пищевого потенциала сырья.

на котором приняты следующие обозначения: ПГ – парогенератор; К – паровой калорифер; СК – конвективная сушильная камера; ВВУ – вакуум-выпарная установка; ПТ – паровая турбина; ЭГ – электрогенератор; ГТ – газовая турбина; ЭВУ – электромагнитная сушильная камера; КРК – криоконцентратор. В расчетах принято: энергетический КПД преобразования топлива в электроэнергию на паротурбинных электростанциях 32%, а на газотурбинных 60%; КПД преобразования электрической энергии в МВ-камерах 75%, а электрический холодильный коэффициент 1,5...2.

На основе предложенной гипотезы предлагается оперировать в расчетах базовыми характеристиками источника энергии, например, топлива с теплотой сгорания 40 МДж/кг.

Проведенные оценки свидетельствуют об энергетических и экономических преимуществах микроволновых сушилок и установок блочного вымораживания. Естественно, капитальные затраты на проектирование и изготовление таких аппаратов окажутся выше, чем у традиционных конструкций, что требует отдельных расчетов.

С помощью предложенной методики проведена оценка эффективности использования энергии в традиционных технологиях сушки и выпаривания и предложенных методов сушки и выпаривания в электромагнитном поле и сравнение традиционных принципов криоконцентрирования и разработанного аппарата блочного вымораживания. Результаты анализа представлены на рисунке 2,

Иновационные проекты новых технологий обезвоживания базируются на следующих положениях:

Положение 1. Перевод сушильной техники на электромагнитные источники энергии приведет к снижению затрат энергии на сушку в связи с направленным,

регулируемым подводом энергии к сырью, отсутствию потерь энергии с отработавшим сушильным агентом, возможностью утилизации энергии удалённого из сырья пара.

Положение 2. 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 паропроизводительности в широком диапазоне концентраций продукта. Реализуется отвод пара из всего объёма жидкости без термической порчи продукта в пограничном слое. В результате получится продукт высокой концентрации, без привкуса «варки», без изменения цвета и аромата.

Положения реализованы в предложенных технологиях (рис. 3).

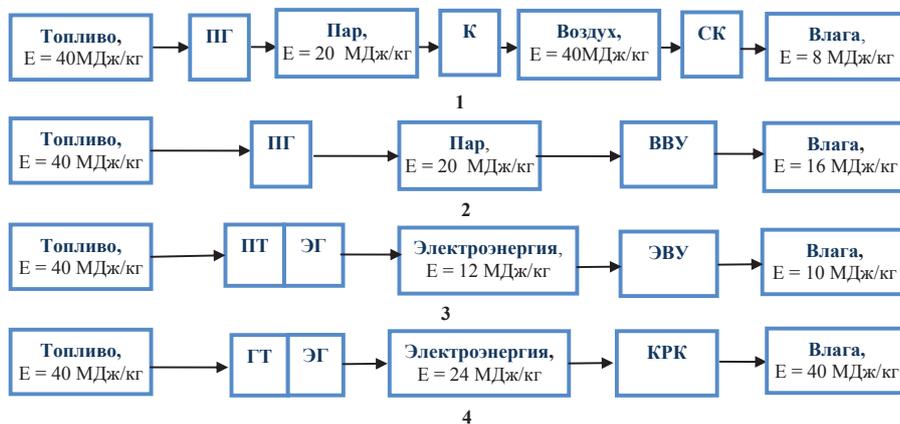


Рис. 2. Конверсия энергии в технологиях обезвоживания (все параметры приведены к 1 кг топлива):

1 – традиционные конвективные технологии сушки; 2 – традиционная технология выпаривания;
3 – микроволновая выпарка; 4 – криоконцентрирование

Fig. 2. Energy conversion in dehydration technologies (all parameters are provided for 1 kg of fuel):

1 – conventional convective drying technologies; 2 – conventional technology of evaporation;
3 – in-microwave residue; 4 – cryoconcentration

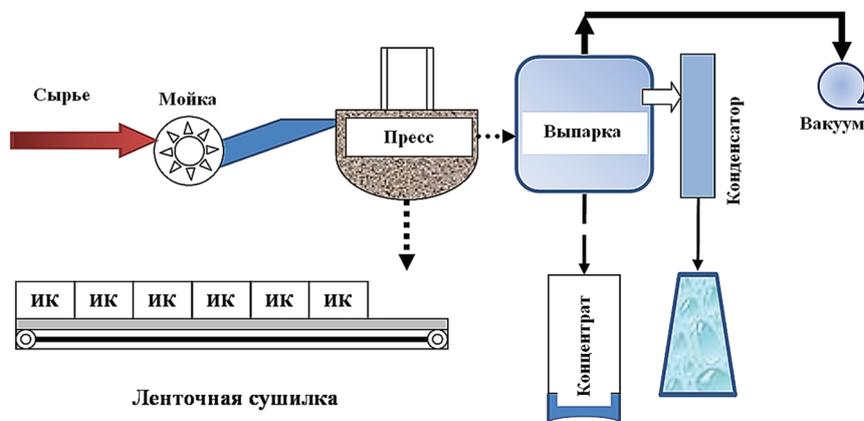


Рис. 3. Инновационные энерготехнологии переработки растительного сырья:

.....► – твердая фаза;► – сок; —► – концентрат сока; —► – конденсат; ◻► – пар

Fig. 3. Innovative energy technologies for processing plant materials:

.....► – solid phase;► – juice; —► – juice concentrate; —► – condensate; ◻► – steam

Ключевыми аппаратами схемы являются: микроволновой вакуум-выпарной аппарат и сушильная установка с инфракрасными (ИК) источниками энергии. После прессования сок поступает в вакуум-выпарной аппарат, а выжимки идут на ленточную сушилку для обезвоживания. Вторичный пар из вакуум-выпарного аппарата поступает в конденсатор, где сжигается и собирается в ёмкости. Основные элементы схемы прошли комплексные стендовые испытания.

Объектами исследований при сушке были яблоки, морковь, свекла, картофель, лук, чеснок, ананас, банан

и кокос. Удельная мощность сушильной установки составила 6 Вт/м^2 , время сушки – 40 мин.

Исследования кинетики сушки в ИК-поле проводились на компьютеризированном стенде. Сырье располагалось на кассете, выполненной из сетки. Вес сырья постоянно измерялся цифровыми весами, регистрировался информационно-измерительным комплексом и обрабатывался по разработанной программе на компьютере. По измеренному весу строились линии убыли влаги и линии скорости сушки. Параллельно регистрировалась температура.

Типичная зависимость убыли влаги во времени для слайсов яблок и моркови приведена на рисунке 4.

Установлено, что вплоть до влагосодержания 20% скорость сушки практически не зависит от количества

влаги в сырье, а определяется только мощностью ИК-генератора. При этом определены температуры продукта (рис. 5), что позволяет обосновано выбирать технологический режим сушки.

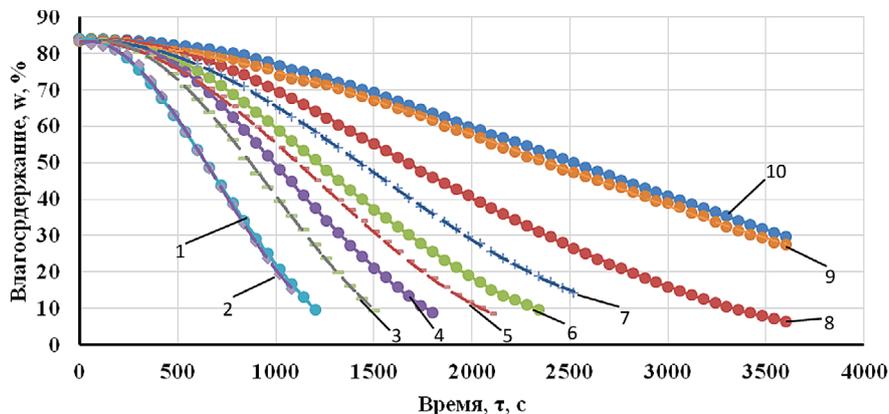


Рис. 4. Линии убыли влаги из сырья:

1, 3, 5, 7, 9 – яблоко; 2, 4, 6, 8, 10 – морковь; 1, 2 – $N = 11,25 \text{ Вт/м}^2$; 3, 4 – $N = 8,75 \text{ Вт/м}^2$; 5, 6 – $N = 6 \text{ Вт/м}^2$; 7, 8 – $N = 3,75 \text{ Вт/м}^2$; 9, 10 – $N = 1,88 \text{ Вт/м}^2$

Fig. 4. Lines of moisture loss from raw materials:

1, 3, 5, 7, 9 – apple; 2, 4, 6, 8, 10 – carrots; 1, 2 – $N = 11.25 \text{ W/m}^2$; 3, 4 – $N = 8.75 \text{ W/m}^2$; 5, 6 – $N = 6 \text{ W/m}^2$; 7, 8 – $N = 3.75 \text{ W/m}^2$; 9, 10 – $N = 1.88 \text{ W/m}^2$

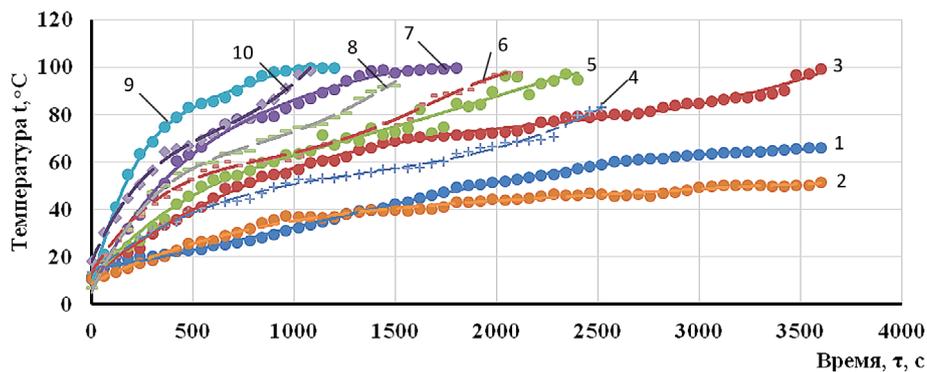


Рис. 5. Термограммы процесса сушки:

1, 3, 5, 7, 9 – яблоко; 2, 4, 6, 8, 10 – морковь; 1, 2 – $N = 1,88 \text{ Вт/м}^2$; 3, 4 – $N = 3,75 \text{ Вт/м}^2$; 5, 6 – $N = 6 \text{ Вт/м}^2$; 7, 8 – $N = 8,75 \text{ Вт/м}^2$; 9, 10 – $N = 11,25 \text{ Вт/м}^2$

Fig. 5. Thermograms of the drying process:

1, 3, 5, 7, 9 – apple; 2, 4, 6, 8, 10 – carrots; 1, 2 – $N = 1.88 \text{ W/m}^2$; 3, 4 – $N = 3.75 \text{ W/m}^2$; 5, 6 – $N = 6 \text{ W/m}^2$; 7, 8 – $N = 8.75 \text{ W/m}^2$; 9, 10 – $N = 11.25 \text{ W/m}^2$

Опыты по сушке (рис. 4) показывают, что сложные процессы при сушке можно упрощенно рассматривать как последовательно протекающие процессы практически постоянной скорости (до влагосодержания $w < 20\%$) и линейно уменьшающейся скорости (при влагосодержании $10\% < w < 20\%$).

Для электромагнитных технологий сушки показатель до в несколько раз превышает традиционные. Причина – возможность удаления влаги в виде тумана. Важную роль играет и вид самой электромагнитной энергии. В традиционной конвективной схеме сушильный агент отдаёт энергию сначала поверхностной влаге, затем сухой части продукта, которая передает энергию влаги в капиллярах. Так протекает традиционная конвективная сушка, результатом которой считается поток влажного пара. В ИК – сушке капиллярная влага удаляется частично непосредственно

электромагнитной энергией, а частично так, как и конвективной сушке.

В случае микроволновой (МВ) сушки из капилляров за счёт бародиффузии может наблюдаться поток смеси влажного пара и капель воды. Состав такой смеси и характеризует удельные затраты энергии на процесс обезвоживания. Чем больше доля капель, тем меньше затрат энергии.

Исследование микроволнового вакуум-выпарного аппарата проводилось в широком диапазоне изменения параметров, для растворов на основе воды, этилового спирта, ацетона при постоянном разряжении (табл. 3).

Экспериментальный стенд состоял из экстракционной камеры, блока силовой электроники, регулируемого системой управления, водяного охлаждения, вакуумного насоса, образцового манометра и весов контроля массы конденсата.

Задачей исследований было определить влияние вида сырья и концентрации на величину паропроизводительности. Опыты проводились при удельной мощности

микроволнового поля 12 Вт/м², при давлении в камере 10...20 кПа.

Результаты исследований представлены на рисунке 6.

Таблица 3

Характеристика объектов и режимов выпарки

Table 3

Characterization of objects and modes of evaporation

Объект	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
Молоко	Вода	12	29
Паста томатная	Вода	16	54,8
Древесина дуба	Вода	63	82,6
Песок	Вода	74,1	97,8
Вино	Вода/этанол	5,8	62,3
Экстракт масла кофе	Этанол	6	77,5
Кофейный шлам	Этанол	56	78,6
Экстракт масла виноградных косточек	Ацетон	8,6	56,4

Результаты исследований позволяют сделать два основных вывода:

1. Значение паропроизводительности практически не зависит от концентрации влаги в сырье.
2. Основным фактором, который определяет величину паропроизводительности, является вид растворителя, его

скрытая теплота фазового перехода. На рисунке 6 видно, что линии паропроизводительности расслоились на водосодержащие, спиртосодержащие и ацетоносодержащие. Именно по этому фактору планируется провести обобщение и получить одну критериальную модель для всех рассмотренных продуктов.

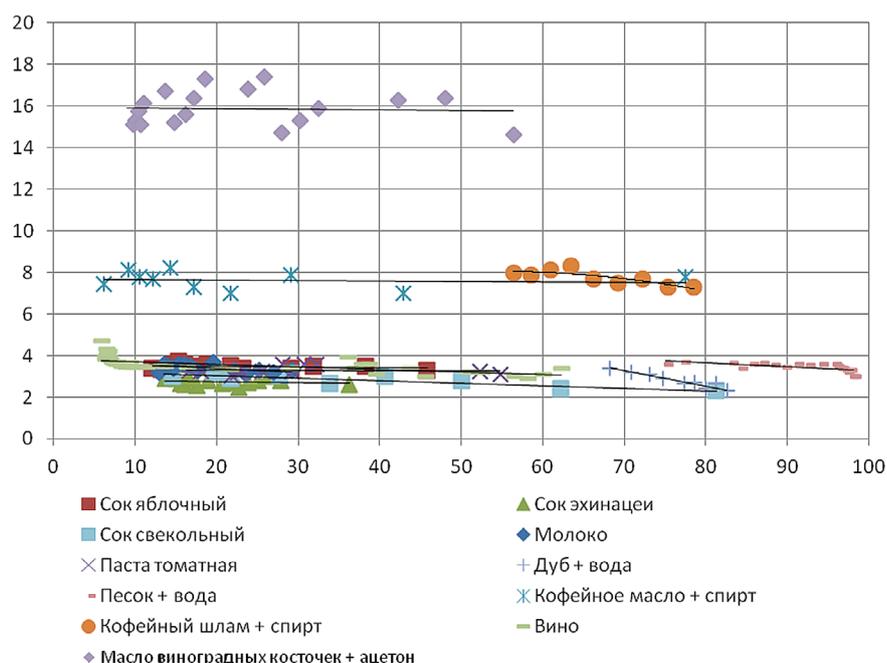


Рис. 6. Зависимость скорости выпаривания (ось X, dW/dt , гр/мин) от концентрации сухих веществ (%) для различных систем

Fig. 6. Relationship between the evaporation rate (X axis, dW / dt , g / min) and the concentration of solids (%) for various systems

Выводы

Предложен универсальный показатель (do) энергетической эффективности системы, который не зависит от термодинамической специфики и колебаний цен на энергоносители. Показатель отражает отношение масс выходной величины (удалённой влаги) к входной (топлива).

Энергетический аспект подтверждает, что электромагнитные технологии выпаривания практически не уступают традиционным по показателю do.

Самые высокие значения показателя do в установках блочного вымораживания.

Технологический аспект работы подтверждает, что инновационные технологии микроволновой вакуумной выпарки и сушки обеспечивают высокую степень сохранения пищевого потенциала сырья. Инновационные технологии блочного вымораживания полностью сохраняют вкус, цвет, аромат и остальные компоненты пищевого потенциала сырья.

Библиографический список

1. Gabor D., Colombo U., King A.S. Beyond the age of waste: a report to the Club of Rome, 2016. 258 p. URL: <https://www.elsevier.com/books/beyond-the-age-of-waste/gabor/978-0-08-027303-7>.
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, no. 1, Pp. 80-88. DOI: [org/10.1080/03066150.2017.1381602](https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602).
3. Govindan K. Sustainable consumption and production in the food supply chain: A conceptual framework. *International Journal of Production Economics*, 2018. Vol. 195. Pp. 419-431. DOI: [10.1016/j.ijpe.2017.03.003](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003).
4. Cai X., Wallington K., Shafiee-Jood M., Marston L. Understanding and managing the food-energy-water nexus—opportunities for water resources research. *Advances in Water Resources*, 2018. Vol. 111. Pp. 259-273. DOI: [org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014).
5. Prosekov A.Y., Ivanova S.A. Food security: The challenge of the present. *Geoforum*, 2018. Vol. 91, Pp. 73-77. DOI: [org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030](https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030).
6. Marsden T. Theorising food quality: some key issues in understanding its competitive production and regulation. In *Qualities of food*. Manchester University Press. 2018. Pp. 129-155. <https://pdfs.semanticscholar.org/d32a/2d70ef085163aaa7e9ee0e6bb8cdca969b8d.pdf>.
7. 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. № 1. Pp. 81-91. DOI: [10.17261/Pressacademia.201519952](https://doi.org/10.17261/Pressacademia.201519952).
8. Gennadii Ryabcev. The Problem Of Informal Impact In The Activities Of Regulatory Authorities And The Ways Of Its Solutions. *Strategic Priorities*. 2017. vol. 44. № 3. Pp. 59-66.
9. Кирич Н.Б., Кінаш І.А. Ресурсоощадність харчових переробних підприємств вимога дня. Book of abstracts International scientific and technical conference "State and prospects of food science and industry". ТНТУ, 2015. Pp. 196-198. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/6526>.

10 Hosovskyi R. Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks. *Chemistry & Chemical technology*. 2016. vol. 10, № 4. Pp. 459-464. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Chemistry_2016_10_4_12.

11 Sabarez Henry T. "Thermal Drying of Foods." *Fruit Preservation*. Springer, New York, № 2018. Pp. 181-210.

12 Kumar C., M.A. Karim. Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical reviews in food science and nutrition* 59.3 (2019): Pp. 379-394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>.

13 Monteiro, Ricardo L. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. *Journal of food engineering*, 232, 2018: Pp. 1-10. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015).

14 Rahman M.M. Multi-scale model of food drying: Current status and challenges. *Critical reviews in food science and nutrition* 58.5, 2018: Pp. 858-876. doi.org/10.1080/10408398.2016.1227299.

15 Sabarez H.T., Keuhbauch S., Knoerzer K. Ultrasound assisted low temperature drying of food materials. *IDS2018. 21st International Drying Symposium Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València, 2018. Pp. 1245-1250.

16 Burdo O.G., Bandura V.N., Levtrinskaya Y.O. Electrochemical technologies of targeted energy delivery in the processing of food raw materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018. vol. 54, № 2, Pp. 210-218. <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375518020047>.

17 Burdo O., Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya Y., Marenchenko E. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. vol. 4, № 11(88). Pp. 34-42. DOI: [10.15587/1729-4061.2017.108843](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843).

References

- 1 Gabor D., Colombo U., King A.S. Beyond the age of waste: a report to the Club of Rome, 2016: 258. URL: <https://www.elsevier.com/books/beyond-the-age-of-waste/gabor/978-0-08-027303-7> (accessed on 10.06.2019) (In English).
- 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; 45; 1: 80-88. DOI: [org/10.1080/03066150.2017.1381602](https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602) (In English).
- 3 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](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003) (In English).
- 4 Cai X., Wallington K., Shafiee-Jood M., Marston L. Understanding and managing the food-energy-water nexus—opportunities for water resources research. *Advances in Water Resources*, 2018; 111: 259-273. DOI: [org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014) (In English).
- 5 Prosekov A.Y., Ivanova S.A. Food security: The challenge of the present. *Geoforum*, 2018; 91: 73-77. DOI: [org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030](https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030) (In English).
- 6 Marsden T. Theorising food quality: some key issues in understanding its competitive production and regulation. In *Qualities of food*. Manchester University Press. 2018: 129-155. <https://pdfs.semanticscholar.org/d32a/2d70ef085163aaa7e9ee0e6bb8cdca969b8d.pdf>. (In English).

7 Balin B.E., Akan D.M. 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. (In English).

8 Gennadii Ryabcev. The problem of informal impact in the activities of regulatory authorities and the ways of its solutions. *Strategic Priorities*. 2017; 44; 3: 59-66. (In English).

9 Kirich N.B., Kinash I.A. Resursooshchadnist' kharchovykh pererobnykh pidpryyemstv vymoha dnya [Resource efficiency of food processing enterprises is an acute requirement]. Book of abstracts International scientific and technical conference "State and prospects of food science and industry". ТНТУ, 2015: 196-198. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/6526> (accessed on 10.06.2019). (In Ukrainian).

10 Hosovskyi R. Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks. *Chemistry & Chemical technology*. 2016; 10; 4: 459-464. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Chemistry_2016_10_4_12. (accessed on 10.06.2019). (In English).

11 Sabarez Henry T. "Thermal Drying of Foods." Fruit Preservation. Springer, New York, 2018: 181-210. (In English).

12 Kumar C., M.A. Karim. Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical reviews in food*

science and nutrition 59.3 (2019): 379-394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269> (In English).

13 Monteiro Ricardo L. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. *Journal of food engineering* 232, 2018: 1-10. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015. (In English).

14 Rahman M.M. Multi-scale model of food drying: Current status and challenges. *Critical reviews in food science and nutrition* 58.5, 2018: 858-876. doi.org/10.1080/10408398.2016.1227299 (In English).

15 Sabarez H.T., S. Keuhbauch K. Knoerzer. Ultrasound assisted low temperature drying of food materials. *IDS2018. 21st International Drying Symposium Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València, 2018: 1245-1250. (In English).

16 Burdo O.G., Bandura V.N., Levtrinskaya Y.O. Electro-technologies of targeted energy delivery in the processing of food raw materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. (2018) 54: 210. doi.org/10.3103/S1068375518020047. (In English).

17 Burdo O., Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya Y., Marenchenko E. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; 4; 11(88): 34-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108843 (In English).

Критерии авторства

Гаврилов А.В. выполнил экспериментальную работу, на основании полученных результатов провёл обобщение и написал рукопись. Гаврилов А.В. имеет на статью авторские права и несёт ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 21.06.2019

Опубликована 18.10.2019

Contribution

A.V. Gavrilov carried out the experimental work, summarized the material based on the experimental results, and wrote the manuscript. A.V. Gavrilov has equal author's rights and bears equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on June 21, 2019

Published 18.10.2019