

## Energy Monitoring of Innovative Energy Technologies of Plant Raw Material Processing

**Burdo O.G.<sup>1</sup>, Gavrilov A.V.<sup>2</sup>, Kashkano M.V.<sup>1</sup>, Levtrynskaya Y.O.<sup>1</sup>, Sirotyuk I.V.<sup>1</sup>,  
Pylypenko E.A.<sup>1</sup>, Terziev S.G.<sup>3</sup>**

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

<sup>2</sup> Academy of bioresources and nature management «Vladimir Vernadskiy CFU»  
Crimea, Ukraine, <sup>3</sup> PAC “Enni Foods”, Odessa, Ukraine

**Abstract.** The analysis of scientific works shows that the development of technology is ahead of the level of development of energy management. There are no clear comparisons of the energy efficiency of electrical technologies and heat technologies. Objective indicators of energy efficiency in various technologies of dehydration of raw materials not developed yet. In that article assumed that objective results for comparing energy efficiency in the processing of raw materials is obtained by the basis of system analysis of the entire energy conversion chain from fuel to finished product. The purpose of the work is experimentally proving the objectivity of this hypothesis. To achieve this goal, it is proposing to use the indicator of the energy share of fuel in the finished product and the amount of moisture removed when burning 1 kg of fuel, which does not depend on fluctuations in energy prices, which can vary and differ for different countries. The most important result of the work is the comparison of these parameters with the data for innovative equipment samples developed by the authors. The significance of the results obtained is that the evaporating devices developed by the authors are not inferior in efficiency to traditional ones, and make it possible to obtain concentrates up to 90 ° brix. Thus, for fuels with an oil equivalent of 40 MJ per 1 kg, traditional dryers can remove no more than 3 kg of moisture, cryoconcentrators – 20 kg.

**Keywords:** energy management, food production, energy efficiency, drying, cryoconcentration, microwave field, dehydration, food concentrates.

**DOI:** 10.5281/zenodo.3367058

### Monitoringul energetic al tehnologiilor de inovații energetice de prelucrare a materiei prime vegetale

**Burdo O.G.<sup>1</sup>, Gavrilov A.V.<sup>2</sup>, Cașcano M.V.<sup>1</sup>, Levtrinscaia Iu.O.<sup>1</sup>, Sirotiuc I.V.<sup>1</sup>,**

**Pilipenco E.A.<sup>1</sup>, Terziev S.G.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Academia Națională a tehnologiilor alimentare din Odesa

<sup>2</sup> Academia de resurse biologice și utilizarea a naturii «KFU V.I. Vernadschi»

<sup>3</sup> Societatea publică «Enni Foods»

**Rezumat.** O analiză a multor lucrări științifice arată că elaborarea intensivă a modelelor inovatoare tehnologice depășește nivelul elaborare a fundamentelor metodologice ale managementului energetic. Nu există comparații clare cu privire la eficiența energetică a tehnologiilor electrice comparativ cu termice, deoarece se utilizează diferite tipuri de energie; nu există indicatori obiectivi ai eficienței energetice în diverse tehnologii pentru deshidratarea materiilor prime. Acest studiu propune o metodologie bazată pe ipoteza că rezultatele obiective la compararea eficienței energetice în procesarea materiilor prime pot fi obținute pe baza unei analize a sistemului întregului lanț de conversie a energiei de la combustibil la produsul finit. Scopul lucrării este de a demonstra experimental obiectivitatea acestei ipoteze. Pentru a atinge acest obiectiv, se propune utilizarea indicatorului cotei de energie a combustibilului în produsul finit și a cantității de umiditate eliminată la arderea a 1 kg de combustibil, care nu depinde de fluctuațiile prețurilor la energie, care pot fluctua și diferi pentru diferite țări. Se realizează o analiză a echilibrelor termice ale instalațiilor de uscare și evaporare, se arată că pentru aceleași sarcini tehnice, evaporarea ne-optimizată este de câteva ori mai eficientă decât procesul de uscare optimizat. Eficiența energetică a combustibilului în schemele tradiționale de uscare, evaporare, crioconcentrare este calculată. Cel mai important rezultat al lucrării este compararea acestor parametri cu datele pentru modelele inovatoare de echipamente. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că evaporatoarele elaborate nu sunt inferioare celor tradiționale în ceea ce privește eficiența și permit producerea de concentrate de până la 90 ° brix.

**Cuvinte-cheie:** managementul energetic, industrii alimentare, eficiența energetică, uscare, crioconcentrare, câmp cu microunde, dehidratare, concentrate alimentare.

**Энергетический мониторинг инновационных энерготехнологий переработки растительного сырья**  
 Бурдо О.Г.<sup>1</sup>, Гаврилов А.В.<sup>2</sup>, Кашкано М.В.<sup>1</sup>, Левтринская Ю.О.<sup>1</sup>, Сиротюк И.В.<sup>1</sup>, Пилипенко Е.А.<sup>1</sup>,  
 Терзиев С.Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Одесская национальная академия пищевых технологий

<sup>2</sup> Академия биоресурсов и природопользования «КФУ им. В.И. Вернадского»

<sup>3</sup> Публичное акционерное общество «Енни Фудз»

г. Одесса, Украина

**Аннотация.** 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. Для достижения этой цели предлагается использовать показатель доли энергии топлива в готовом продукте и количество удаленной влаги при сжигании 1 кг топлива, который не зависит от колебания цен на энергоносители, которые могут колебаться 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. Наиболее важным результатом работы является сравнение этих параметров с данными для инновационных образцов техники, разработанных авторами. Значимость полученных результатов состоит в том, что разработанные авторами выпарные установки не уступают по эффективности традиционным, и позволяют получать концентраты до 90 °brix. Так, для топлива с нефтяным эквивалентом 40 МДж на 1 кг традиционные сушилки могут удалить не более 3 кг влаги, криоконцентраторы – 20 кг. Достигнуты результаты, соответственно, до 6 и до 100 кг влаги.

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

## Введение

Глобальная прогнозная модель «Римского клуба» [1] определила приоритеты развития человечества в XXI веке. В ближайшем будущем до 2030 года прогнозируется решение задач обеспечения мировой экономики энергией и обострение следующей проблемы – роста нагрузки на окружающую среду [2]. К концу столетия нас ожидает масштабный продовольственный кризис [3-4]. Концептуальная идея модели «Римского клуба» может быть выражена схемой (табл.1).

Каждый кризис формируется из трех этапов: развитие, бурный рост и стабилизация на достигнутом уровне (табл.1). В настоящее время человечество активно ищет решение проблемы энергетической эффективности. Наиболее остро эти задачи характерны для стран, которые из энергорасточительных, но энергообеспеченных, оказались

энергодефицитными странами, но до сих пор осталась энергорасточительными.

Поэтому, энергетический кризис в таких странах развивается чрезвычайно остро. Особенно, если в стране отсутствуют научно обоснованные энергетические программы, нет действенной системы энергоменеджмента.

Основные глобальные проблемы человечества наиболее остро касаются технологий производства пищи: это и энергетика, и экология, и непосредственно продукты питания [3]. Для развивающихся стран, в первую очередь, это касается агропромышленного комплекса, который является лидером по объему потребляемых энергетических ресурсов. Здесь удельные затраты энергии в 2-4 раза выше, чем в индустриально развитых странах [3-4]. Безотходные пищевые технологии смогут не только решать проблемы экологической безопасности производства, но и резервных источников пищи.

Периоды формирования глобальных кризисов / Periods of formation of global crises

	кризисы / crises	периоды, годы / periods, years		
		развития / progress	бурного роста / rapid growth	стабилизации / stabilization
1	Энергия / energy	1970 - 1900	1900 -2020	2020-2030
2	Экология / ecology	2010-2030	2030-2050	2050 - 2070
3	Пища / food	2040-2060	2060-2080	2080- 3000

Безотходные пищевые технологии смогут не только решать проблемы экологической безопасности производства, но и резервных источников пищи. Однако решение этих проблем требует революционных преобразований в пищевой и перерабатывающей отраслях. Необходим переход к принципиально новым технологическим приемам. Производство неэнергоёмких пищевых продуктов повышенной пищевой ценности, создание ассортимента новых образцов, глубокая переработка пищевого сырья однозначно требуют использования современных приемов в технологиях.

Методы построения прогнозных моделей предполагают системный подход и структурный анализ. Энергетическая составляющая таких моделей разрабатывается с привлечением принципов энергетического менеджмента. Особенно важно это учитывать на стадии проектирования инновационных технологий для производства продуктов питания.

## I. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ФОРМУЛИРОВКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ГИПОТЕЗ

Серьезный анализ энергоэкологических проблем в индустриально развитых странах проводится регулярно, собираются и систематизируются данные как об отдельных промышленных объектах [5-6], так и о состоянии окружающей среды в целом [2, 7]. Исследований, подобных «модели римского клуба», в рамках Государственных программ, в развивающихся странах, к сожалению, не проводилось. Программные работы [8-9] имеют декларативный характер, разработчики не имеют возможности дать глубокое научное обоснование проектам. Поэтому, анализ проблемы можно осуществить только на основании общих закономерностей, изложенных выше, и некоторой специфике, характерной для

страны, тенденций, которые к настоящему времени сложились. Это чрезвычайно актуальная проблема, поскольку преимущество в развитии получают сообщества, которые сумеют первыми выйти из этих кризисов (табл.1). Решение проблем этих кризисов требует комплексного подхода.

Наиболее энергоёмкими в пищевых производствах являются технологии обезвоживания пищевого сырья [10-12]. Преимущественно используются технологии перевода влаги в пар (выпарка, сушка) [13-15]. В последнее время растет интерес к криоконцентрированию [13].

В энергетическом балансе экономики агропромышленный сектор занимает лидирующие позиции при крайне низкой эффективности использования ресурсов. Наиболее энергоёмкими в пищевой и перерабатывающей индустрии являются технологии обезвоживания сырья. 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 85%, то лучшие сушильные технологии не превышают 40% [10-13].

Наибольшее распространение в мире получили конвективные сушилки. Это высокопроизводительные установки, интенсификация процессов массопереноса в которых достигается за счет повышения расхода сушильного агента [14]. 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. Инновационные технологии зачастую не используются ввиду высокой конструктивной сложности и трудностей эксплуатации [15, 16], либо низкой производительности [17].

Традиционные технологии конвективной сушки сырья столкнулись с серьезными противоречиями. Задача достижения высоких значений коэффициентов массопереноса решается путем 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, сушки и вопросов моделирования, проблемы энергетики процессов обезвоживания, особенно для инновационных технологий, исследуются редко [18-19].

Самостоятельной серьезной проблемой является методология сравнения энергоэффективности электротехнологий и теплотехнологий, поскольку используются различные виды энергии; отсутствуют объективные показатели эффективности использования энергии в различных технологиях обезвоживания сырья [15-22]. Экспериментальные методы удобны только для термодинамического анализа, экономические показатели для условий развивающихся стран – не стабильны. Известные методы энергетического менеджмента, которые оперируют коэффициентом удельного энергопотребления (SER), 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 [20-22]. Строгих методов оценки энергетической эффективности, особенно инновационных энерготехнологий, нет. Авторами данной статьи предложена новая методология, подтвержденная результатами исследований. 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».

## II. РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТА

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. Причем, 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 [23] не дают рекомендаций, по количественной оценке, влияния «реверсных потоков». Известно предложение развития теоретических основ энергомониторинга, разработка метода оценки энергетических КПД «реверсных потоков» [24] иерархической оценки эффективности использования энергии в теплотехнологической схеме.

Последовательно, энергетические КПД отдельных элементов системы определяются отношением величины энергии на выходе ( $E_i$ ) из  $i$ -го анализируемого элемента и значения на входе ( $E_{i-1}$ ). Разница этих потоков определяет потери энергии ( $Q_i$ ) в  $i$ -м элементе.

$$\eta_{\cdot i} = \frac{E_i}{E_{i-1}} = \frac{E_{i-1} - Q_i}{E_{i-1}} \quad (1)$$

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

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

Итоговый тепловой показатель системы определяется [17]:

$$\eta = \frac{E_{pr} + \sum_i Q_{pi}}{E_T} = \prod_{n=1}^n \eta_i + \frac{\sum_i Q_{pi}}{E_T}, \quad (3)$$

где  $E_{pr}$  – энергия на производство продукта;  $E_T$  – энергия топлива.

На основе предложенной гипотезы предлагается оперировать в расчетах базовыми характеристиками источника энергии, например, топлива с теплотой сгорания 40 МДж/кг. Т.е. 1 кг нефтяного

эквивалента (кг н.э.) выделяет энергию в 40 МДж/кг н.э.

Для проведения анализа предлагается ввести показатели эффективности использования энергии топлива:

$E_u$  – доля полезной в процессе энергии;

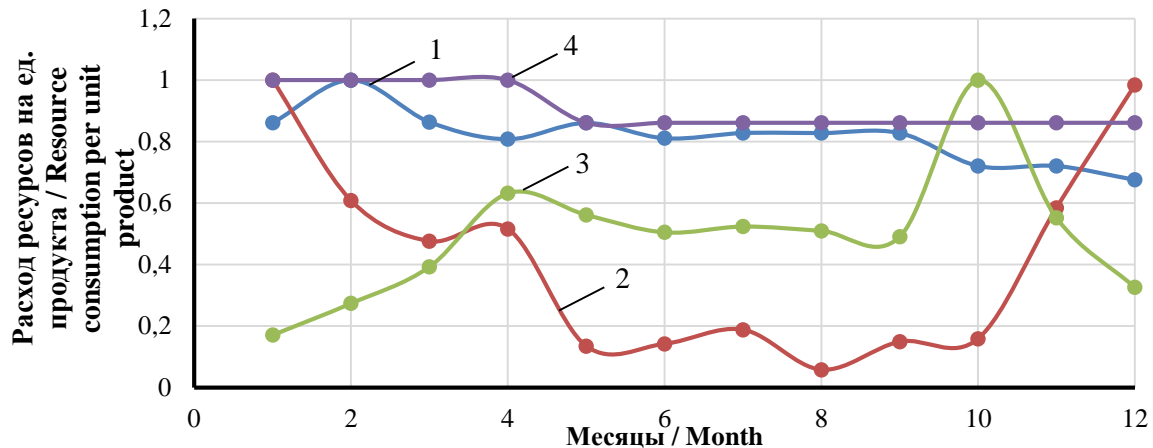
$O$  – соотношение кг удаленной влаги к кг н.э.:

$$d_o = \frac{E_u}{O}$$

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

### III. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТИПОВЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

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



1 – электроэнергия / electricity; 2 – газ / gas; 3 – вода / water; 4 – продукт / product

Рис.1. Результаты энергетического мониторинга молочного завода.

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

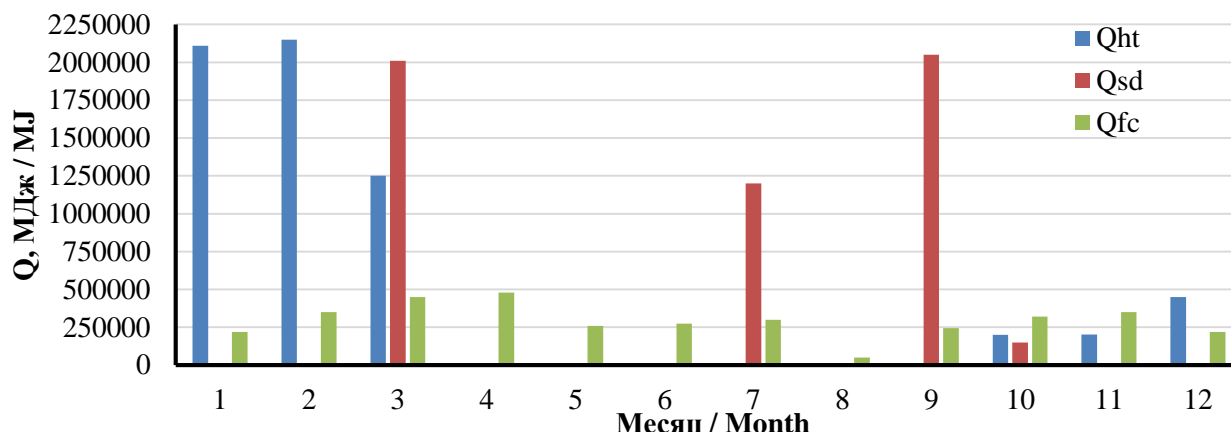
Анализ данных (рис.1) дает возможность сделать такие выводы:

- расход электроэнергии и воды удовлетворительно коррелируются с объемом выпуска продукции;
- объем 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 серьезная проблема выявить конкретное влияние каждой технологии обезвоживания в общем балансе. Например, пище

концентратное производство выпускает растворимый кофе и концентраты различных блюд. Метод энергетического аудита заключался в том, что последовательно исследовались летние месяцы (когда отсутствует отопление), и месяцы, когда распылительная сушилка кофе не работала (рис.2, месяцы 4, 5, 6).

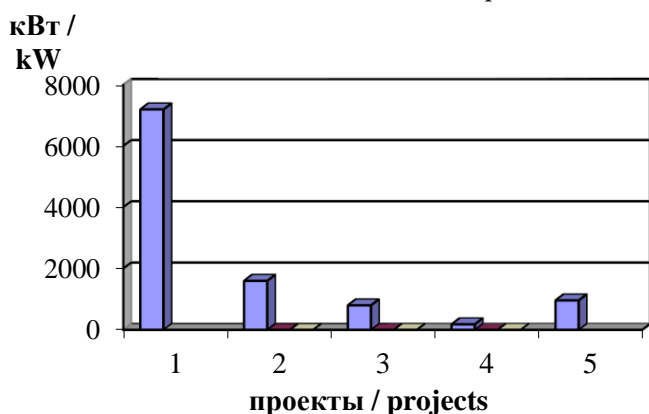
Видно (рис.2), что расходы на распылительную сушилку ( $Q_{sd}$ ) соизмеримы с расходами на отопление ( $Q_{ht}$ ) в зимнее время. Расходы энергии на сушилку при производстве пищевых концентратов ( $Q_{fc}$ ) относительно стабильны.



**Рис.2. Результаты энергетического мониторинга пищевого концентратного завода. / Fig.2. The results of energy monitoring of food concentrating plant.**

В результате энергетических исследований на основе системного анализа обоснованы инновационные проекты

совершенствования пищевого концентратного производства (рис.3).



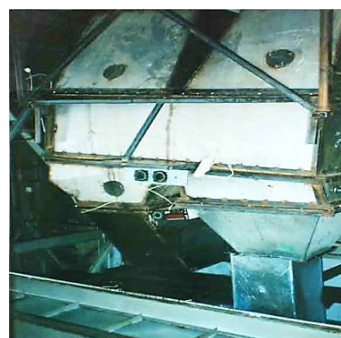
- 1 – пакет организационных проектов / organizational project package;
- 2 – модернизация оборудования / equipment upgrade;
- 3 – утилизация тепловых выбросов / heat recovery;
- 4 – усиление тепловой изоляции / thermal insulation gain;
- 5 – внедрение новых, энергоэффективных технологий / introduction of new, energy efficient technologies

**Рис. 3. Сравнение энергетической эффективности проектов. / Fig. 3. Comparison of energy efficiency of projects.**

Наибольшая мощность потерь тепловой энергии характерна для организационных проектов (рис.3). Причем, это практически беззатратные проекты.

Ощутимая эффективность получена от внедрения теплоутилизатора (ТМУ) в линию растворимого кофе (рис.4).

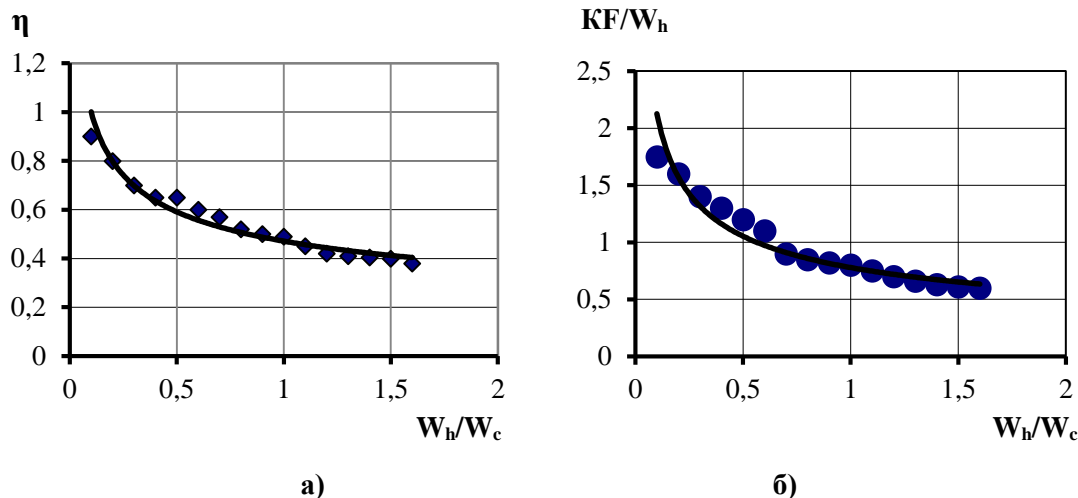
Аппарат внедрен в технологии растворимого кофе предприятия «Энни Фудз». Установлен ТМУ после циклонов распылительной сушилки (рис.5). ТМУ снижает расход топлива на 10-25 %. Извлекает из газовых выбросов от 40 до 99 % пыли продукта. Состоит из 200 двухфазных термосифонов. Тепловая мощность модуля 0,1...0,5 МВт.



**Рис.4. Теплоутилизатор. / Fig.4. Heat and mass utilizer.**

Габаритные размеры: 1650x2000x600. Результаты стендовых испытаний аппарата обработаны в виде зависимостей КПД и

числа единиц переноса (рис.5) от соотношения полных теплоемкостей горячего ( $W_h$ ) и холодного ( $W_c$ ) потоков.



**Рис. 5. Зависимость КПД (а) и числа единиц переноса (б) от соотношения полных теплоемкостей потоков. / Fig. 5. Dependence of the efficiency (а) and the number of transport units (б) on the ratio of the total heat capacities of the flows.**

Приведенные графики (рис.5) можно использовать для экспресса – оценки эффективности воздухоподогревателей. Обоснован типоразмерный ряд воздухоподогревателей на термосифонах.

Энергетика сушильных установок требует серьезных исследований и улучшений.

#### 4. Исследование энерготехнологий обезвоживания.

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. После 1950 г. начали развиваться низкотемпературные технологии разделения пищевых жидкостей. К 1990 г. удельные затраты энергии криотехнологий (КТ1) на выделение 1 кг льда из раствора достигли 1,1 МДж [17]. А это ощутимо меньше, чем даже у 7- ступенчатых вакуум-выпарных установок. Вместе с тем, с 1985 г. появились разработки ОНАПТ вымораживающих установок блочного типа (КТ2), у которых параметр  $J$  достигал 0,7 МДж на 1кг 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 иллюстрируется табл.2. Предложенная методология принята при оценке эффективности использования энергии в традиционных технологиях сушки и выпаривания и предложенных в ОНАПТ методов сушки и выпаривания в электромагнитном поле (ЭМП) [21].

Выполнено сравнение традиционных принципов криоконцентрирования [24] и разработанного в ОНАПТ аппарата блочного вымораживания [22]. Результаты анализа представлены в таблице 3.

Значение  $d_o = 6$  кг в/кг н.э. в настоящее время достигнуто при испытаниях сушильных аппаратов с ЭМП. Визуально отмечено, что из камеры выходит пароводяная смесь [22]. Аппараты реализуют режим бародиффузии, а это существенно снижает расход энергии. Реально достичь значений  $d_o = 50$  кг в/кг н.э. при четком

согласовании мощности ЭМП генераторов с характеристиками пищевого сырья.

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) [24]. 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.

Таблица 2. / Table 2.

Энергоемкость технологий обезвоживания / Energy intensity of dehydration technology

№	Процесс/ process Параметры / parameters	парообразование / vapoescence		кристаллизация / crystallization
		выпарка / evaporation	сушка / drying	
1	теоретические затраты энергии на удаление 1 кг влаги, МДж / theoretical energy costs for the removal of 1 kg of moisture, MJ	2,3	2,3	0,33
2	действительные затраты энергии на удаление 1 кг влаги, МДж / actual energy costs for the removal of 1 kg of moisture, MJ	1,5...2,8	4...7	1,15

Таблица 3. / Table 3.

Сравнение традиционных и предложенного показателей энергоэффективности различных технологий обезвоживания / Comparison of traditional and proposed indicators of energy efficiency of various dehydration technologies

Энерго-технология / Energy technology	SER, МДж/кг / MJ / kg	J, МДж/кг н.э. / MJ / kg o.e.	do, кг в/кг н.э. / kg m / kg o.e.
сушка традиционная / traditional drying	4 ... 7	4 ... 9	1 ... 3
сушка в ЭМП / MWA drying	2 ... 4	10 ... 20	5 ... 6
выпарка+сушка традиционная / evaporation + traditional drying	2,8	8 ... 20	3 ... 6
выпарка в ЭМП / MWA evaporation	2,7	10 ... 20	3,5 ... 7,5
Криоконцентрирование / cryoconcentration	1,1	24	20 ... 21
блочное вымораживание / block freezing	0,3 ... 0,7	35	50 ... 100

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

С помощью предложенной методики проведена оценка эффективности использования энергии в традиционных технологиях сушки и выпаривания и предложенных в ОНАПТ методов сушки и выпаривания в электромагнитном поле, и сравнение традиционных принципов криоконцентрирования и разработанного в ОНАПТ аппарата блочного вымораживания. Результаты анализа представлены на рис.6.

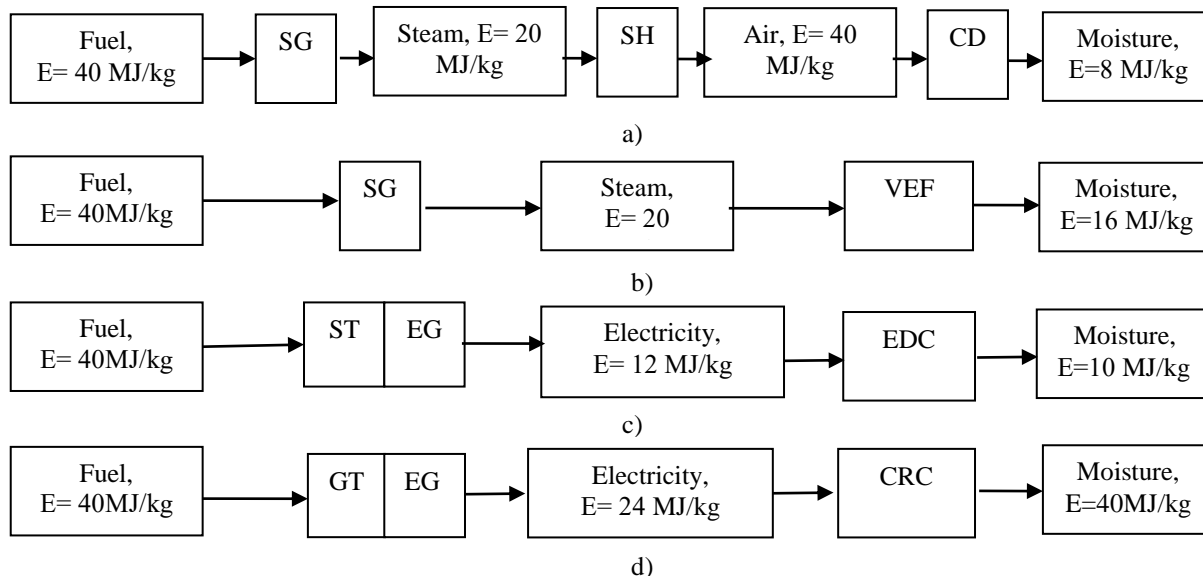
На рис.6 приняты следующие обозначения: Fuel – топливо; Steam – пар; Air – воздух; Moisture – влага SG – парогенератор / steam generator; SH – паровой калорифер / steam heater; CD – конвективная сушильная камера / convective drying chamber; VEF – вакуум-выпарная установка; ST – паровая турбина / steam turbine; EG – электрогенератор / electro-generator; GT – газовая турбина / gas turbine; EDC – электромагнитная сушильная камера / electromagnetic drying chamber; CRC – криоконцентратор / cryoconcentrator. 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.

Проведенные оценки свидетельствуют об энергетических и экономических

преимуществах предлагаемых аппаратов. Естественно, капитальные затраты на проектирование и изготовление таких аппаратов окажутся выше, чем у традиционных конструкций, что требует отдельных расчетов.



a) традиционная конвективная сушка / traditional convective drying; b) традиционное выпаривание / traditional evaporation; c) микроволновая выпарка / microwave evaporation; d) криоконцентрирование / cryoconcentration.

**Рис.6. Конверсия энергии в технологиях обезвоживания(все параметры приведены к 1кг топлива). / Fig.6. Energy conversion in dehydration technologies (all parameters are reduced to 1 kg of fuel).**

Инновационные проекты новых технологий обезвоживания базируются 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, отсутствию потерь энергии с отработавшим сушильным агентом, возможностью утилизации энергии удаленного из сырья пара.

**Гипотеза 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 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:

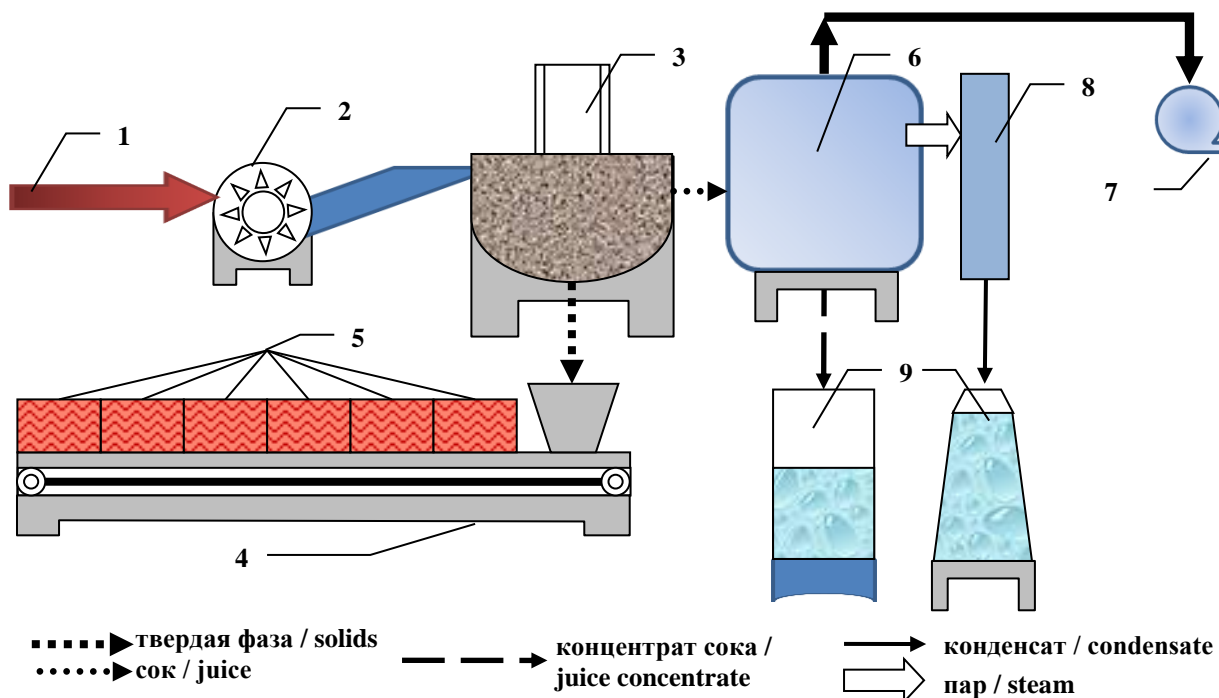
- наличие в объеме продукта жидкости с полярными молекулами;
- соответствие параметров электромагнитного поля решаемой задачи теплопереноса;
- согласование структурных характеристик продукта с параметрами электромагнитной энергии.

Для подавляющего вида пищевого сырья указанные условия выполняются.

Гипотезы реализованы в предложенных технологиях (рис.7). 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

сжижается и собирается в емкости. Основные элементы схемы прошли комплексные стендовые испытания.



1 – сырье / raw; 2 – мойка / washer; 3 – пресс / squeezer; 4 – ленточная сушилка / belt dryer; 5 – ИК-генераторы / IR generators; 6 – выпарка/ evaporation; 7 – вакуумный насос / vacuum pump; 8 – конденсатор / condensator; 9 – сборник конденсата / condensate tank.

**Рис.7. Инновационные энерготехнологии переработки растительного сырья.**  
**Fig.7. Innovative energy technologies for processing vegetable raw materials.**

Объектами исследований при сушке были яблоки, морковь, свекла, картофель, лук, чеснок, ананас, банан и кокос. Некоторые объекты представлены в настоящей работе. Получены различные формы продуктов: чипсы (а) и порошки (b) (табл.4).

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 регистрировались температуры.

Таблица 4. / Table 4.

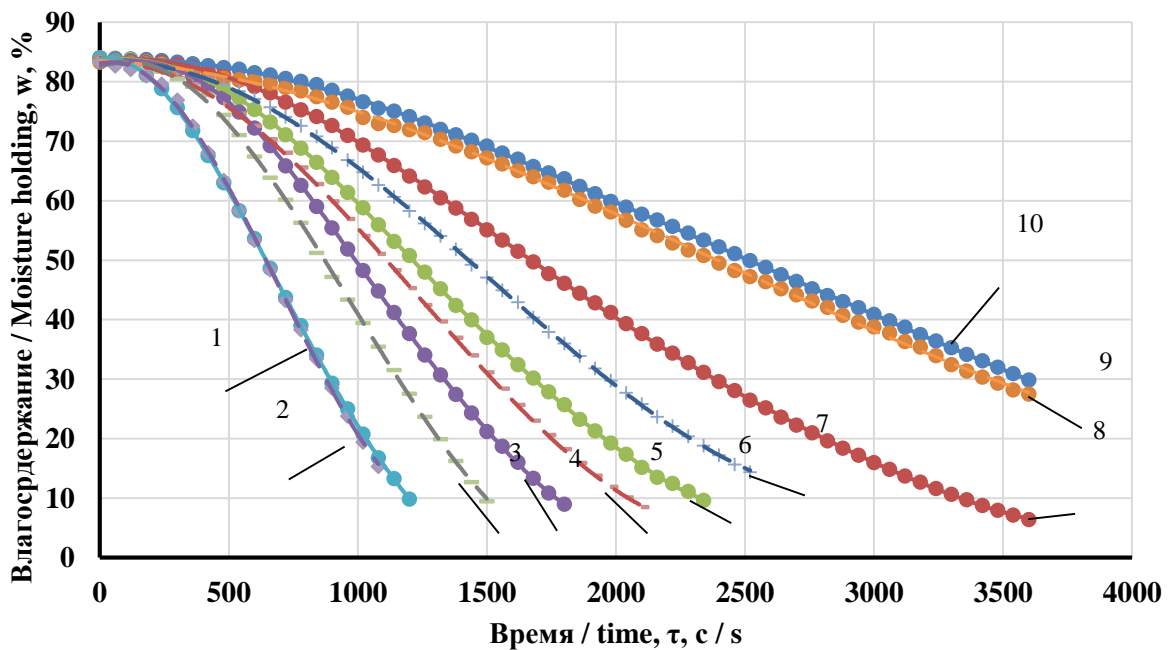
Характеристика объектов и режимов сушки / Characteristics of objects and modes of drying

	Сырье / Raw	Слой, мм / Layer, mm	Удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup> / Specific power, W / m <sup>2</sup>	Время, мин / Time, min	Продукт / product
1	Яблоки (слайсы) / Apples (slices)	3	6000	40	a
2	Яблоки (выжимки) / Apples (refuse)	3	6000	40	b
3	Морковь (слайсы) / Carrots (slices)	3	6000	40	a

Таблица 4. / Table 4 (Продолжение)

4	Морковь (выжимки) / Carrot (refuse)	3	6000	40	b
5	Свекла (выжимки) / Beetroot (refuse)	3	6000	45	b
6	Ананас (слайсы) / Pineapple (slices)	8-12	6000	50	a
7	Кокос (слайсы) / Coconut (slices)	1-2	6000	50	a
8	Банан (слайсы) / Banana (slices)	2-3	6000	45	a
9	Картофель (слайсы) / Potatoes (slices)	3	6000	45	a
10	Лук (кубики) / Onion (cubes)	3	6000	40	a
11	Лук (соломка) / Onion (straw)	3	6000	55	a
12	Тыква (слайсы) / Pumpkin (slices)	3	6000	50	a

Типичная зависимость убыли влаги во времени для слайсов яблок и моркови приведена на рис. 8. На основе данных (рис.8) построены линии скорости сушки (рис.9).



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

Рис. 8. Линии убыли влаги из сырья. / Fig. 8. Lines of moisture loss from raw materials.

Установлено (рис.9), что вплоть до влагосодержания 20 % скорость сушки практически не зависит от количества влаги в сырье, а определяется только мощностью ИК-генератора.

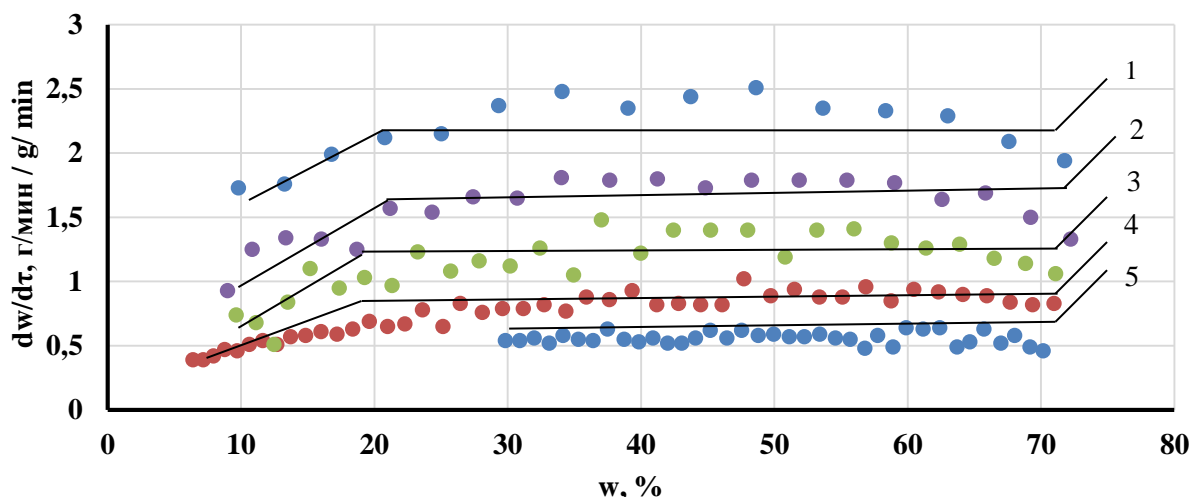
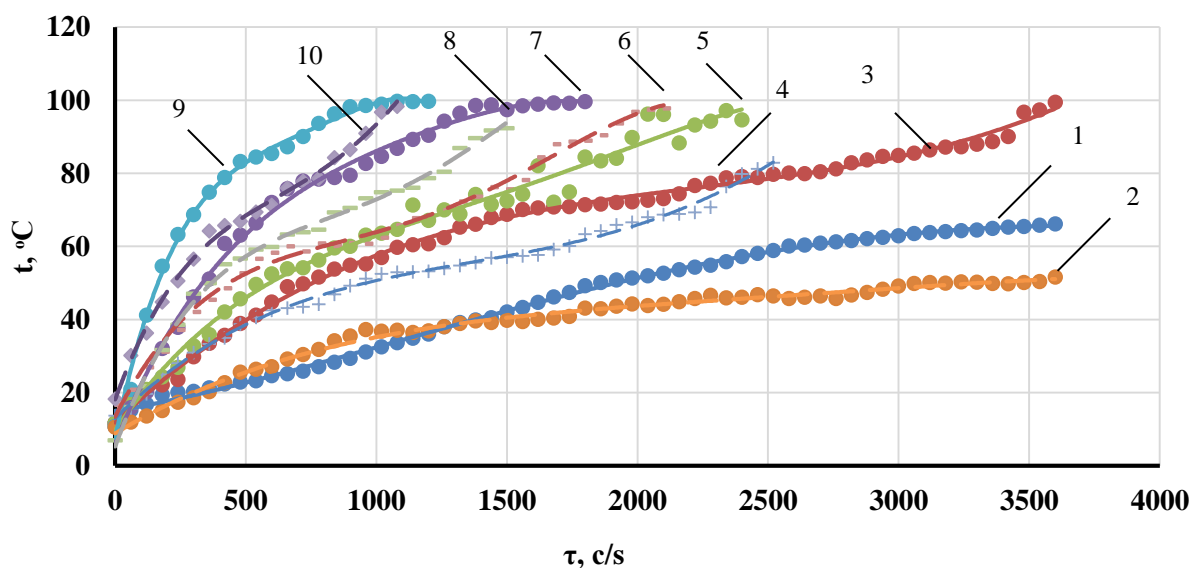


Рис. 9. Линии скорости сушки для слайсов яблок при плотности ИК- потока / Drying speed lines for apple slices at IR flux density: 1 – 11.25 Вт/м<sup>2</sup>/ W/m<sup>2</sup>; 2 – 8.75 Вт/м<sup>2</sup>/ W/m<sup>2</sup>; 3 – 6 Вт/м<sup>2</sup>; 4 – 3.75 Вт/м<sup>2</sup>/ W/m<sup>2</sup>; 5 – 1.88 Вт/м<sup>2</sup>/ W/m<sup>2</sup>.

При этом, определены температуры продукта (рис.10), что позволяет обосновано выбирать технологический режим сушки для различных пищевых продуктов.



1, 3, 5, 7, 9 – яблоко / apples; 2, 4, 6, 8, 10 – морковь/carrot; 1, 2 – N = 1.88 Вт/м<sup>2</sup> / W/m<sup>2</sup>; 3, 4 – N = 3.75 Вт/м<sup>2</sup> / W/m<sup>2</sup>; 5, 6 - N = 6 Вт/м<sup>2</sup> / W/m<sup>2</sup>; 7, 8 – N = 8.75 Вт/м<sup>2</sup> / W/m<sup>2</sup>; 9, 10 – N = 11.25 Вт/м<sup>2</sup> / W/m<sup>2</sup>

Рис. 10. Термограммы процесса сушки. / Fig. 10. Thermograms of the drying process

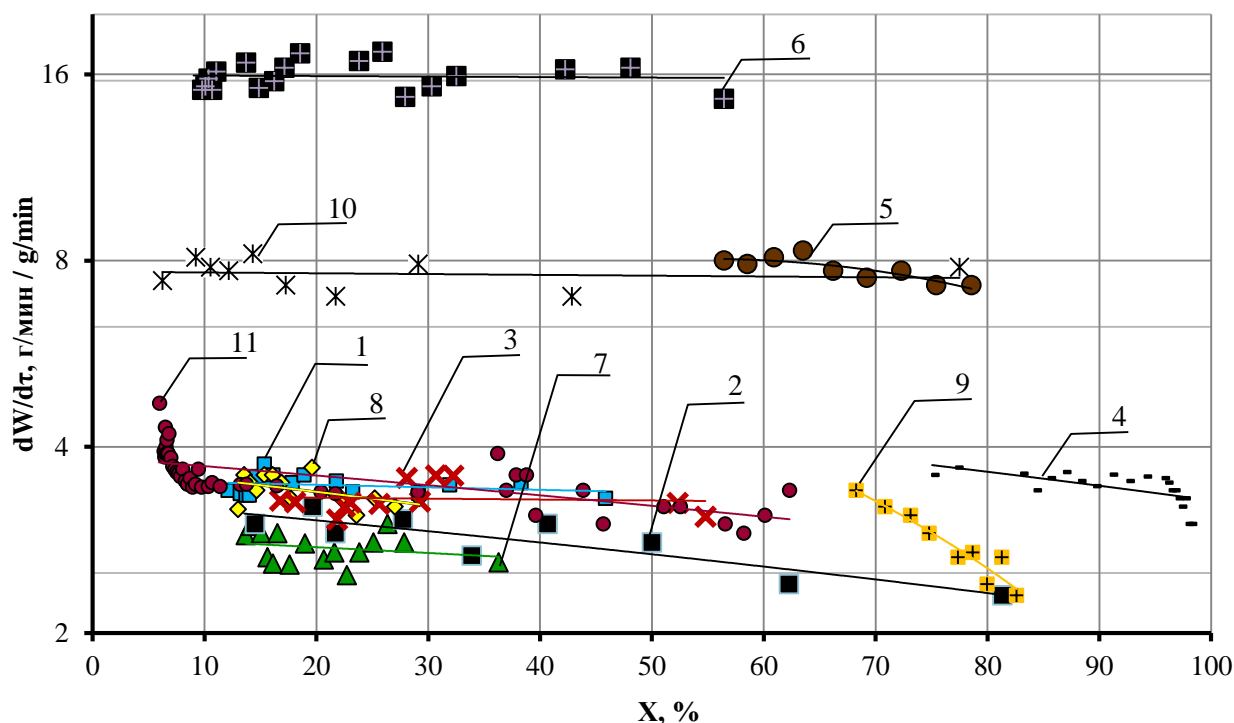
Исследование микроволнового вакуум-выпарного аппарата проводилось в широком диапазоне изменения параметров, для растворов на основе воды, этилового спирта, ацетона при постоянном разряжении 10 кПа (Таблица 5).

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

Таблица 5./ Table 5.

Характеристика объектов и режимов выпарки / Characteristics of objects and modes of evaporation

	Объект / Object	Растворитель / Solvent	Удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup> / Specific power, W / m <sup>2</sup>	Концентрация / concentration, %	
				сырья / raw	продукта / product
1	Сок яблочный / Apple juice	Вода / Water	6500	11,6	45,8
2	Сок эхинацеи / Echinacea juice	Вода / Water	6500	13,5	36,3
3	Сок свекольный / Beetroot juice	Вода / Water	6500	12,2	81,3
4	Молоко / Milk	Вода / Water	6500	12	29
5	Паста томатная / Tomato paste	Вода / Water	6500	16	54,8
6	Древесина дуба / Oak bark	Вода / Water	1700	63	82,6
7	Песок / Sand	Вода / Water	6500	74,1	97,8
8	Вино / Wine	Вода+этанол / Water+Ethanol	6500	5,8	62,3
9	Экстракт масла кофе / Coffee oil extract	Этанол / Ethanol	13100	6	77,5
10	Кофейный шлам / Coffee sludge	Этанол / Ethanol	6500	56	78,6
11	Экстракт масла виноградных косточек / Grape seeds oil extract	Ацетон / Acetone	19700	8,6	56,4



1 – сок яблочный / apple juice; 2 – сок свекольный / beetroot juice; 3 – паста томатная / tomato paste; 4 – песок / sand; 5 – кофейный шлам / coffee sludge; 6 – масло виноградных косточек / grape seeds oil; 7 – сок эхинацеи / Echinacea juice; 8 – молоко / milk; 9 – дуб / oak bark; 10 – кофейное масло / coffee oil; 11 – вино / wine

Рис. 11. Линии скорости выпаривания. / Fig. 11. Evaporation rate lines.

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

микроволнового поля 6500 Вт/м<sup>2</sup>, при давлении в камере 10... 20 кПа.

Результаты исследований (рис.11) позволяют сделать два основных вывода.

1. Значение паропроизводительности практически не зависит от концентрации сырье влаги.

2. Основным фактором, который определяет величину паропроизводительности, является вид растворителя, его скрытая теплота фазового перехода. Видно (рис.11), что линии паропроизводительности расслоились на водосодержащие, спиртосодержащие и ацетонсодержащие. Именно по этому фактору планируется провести обобщение и получить одну критериальную модель для всех рассмотренных продуктов.

Опыты по сушке (рис.8) показывают, что сложные процессы при сушке можно упрощенно рассматривать как последовательно протекающие процессы практически постоянной скорости (до влагосодержаний  $w < 20\%$ ) и линейно уменьшающейся скорости (при влагосодержаниях  $10\% < w < 20\%$ ).

**Выводы.** Методологический аспект работы заключается в том, что предложен универсальный показатель ( $d_0$ ) энергетической эффективности системы, который не зависит от термодинамической специфики и колебаний цен на энергоносители. Показатель отражает отношение масс выходной величины (удаленной влаги) к входной (топлива).

Энергетический аспект подтверждает, что электромагнитные технологии выпаривания практически не уступают традиционным по показателю ( $d_0$ ).

Для электромагнитных технологий сушки показатель ( $d_0$ ) 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 отдает 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 счет 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.

Самые высокие значения показателя ( $d_0$ ) в установках блочного вымораживания, разработанных в ОНАПТ.

Технологический аспект работы подтверждает, что инновационные технологии ОНАПТ микроволновой вакуумной выпарки и сушки обеспечивают высокую степень сохранения пищевого потенциала сырья.

Инновационные технологии ОНАПТ блочного вымораживания полностью сохраняют вкус, цвет, аромат и остальные компоненты пищевого потенциала сырья.

#### Литература (References)

- [1] Gabor D., Colombo U., King A. S. Beyond the age of waste: a report to the Club of Rome. – Elsevier, 2016. 258 p.
- [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, 80-88.
- [3] Govindan K. Sustainable consumption and production in the food supply chain: A conceptual framework. *International Journal of Production Economics*, 2018. 195, 419-431.
- [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.
- [5] Prosekov A. Y., & Ivanova S. A. Food security: The challenge of the present. *Geoforum*, 2018. vol. 91, 73-77.
- [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.
- [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. no. 1. 81-91.
- [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. 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*". THTY, 2015.c. 196-198.
- [10] Hosovskyi R. et al. Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks. *Chemistry & Chemical technology*. 2016. vol. 10, no. 4. 459-464.
- [11] Sabarez, Henry T. "Thermal Drying of Foods." *Fruit Preservation*. Springer, New York, NY, 2018. 181-210.
- [12] Kumar, C., and M. A. Karim. "Microwave-convective drying of food materials: A critical review." *Critical reviews in food science and nutrition* 59.3 (2019): 379-394.
- [13] Monteiro, Ricardo L., et al. "Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices." *Journal of food engineering* 232, 2018: 1-10.
- [14] Rahman, M. M., et al. "Multi-scale model of food drying: Current status and challenges." *Critical reviews in food science and nutrition* 58.5, 2018: 858-876.
- [15] Sabarez, H. T., S. Keuhbauch, and K. Knoerzer. "Ultrasound assisted low temperature drying of food materials." *IDS 2018. 21st International Drying Symposium Proceedings. Editorial Universitat Politècnica de València*, 2018. p/1245-1250.
- [16] Zambon, A., et al. "Supercritical CO2 drying of food matrices." *IDS 2018. 21st International Drying Symposium Proceedings. Editorial Universitat Politècnica de València*, 2018. p. 17-23
- [17] Rodríguez, Óscar, et al. "Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: effects on quality." *Journal of the Science of Food and Agriculture* 98.5, 2018: 1660-1673.
- [18] 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, 488-498.
- [19] Chantasiriwan S. Simulation of quadruple-effect evaporator with vapor bleeding used for juice heating. *International Journal of Food Engineering*. 2016, vol. 2, no. 1, 36-41.
- [20] Ul'ev L., M., Vasil'ev M. A. Heat and power integration of processes for the refinement of coking products. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2015. vol. 49. no. 5. 676-687.
- [21] 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, no. 2, 210-218.
- [22] 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, no. 11(88). 34-42.
- [23] Левин С. Е., Нагибин С. Я., Шилов В. В. Мониторинг промышленной безопасности топливно-энергетического комплекса. *Национальная безопасность России: актуальные аспекты*. 2018. 30-36.
- [24] Тришин Ф. А., Трач А. Р., Орловская Ю. В. Управление потоками энергии в низкотемпературных разделительных установках. *Проблемы региональной энергетики*. 2018. Vol. 1, no. 36. С. 72-86.

**Сведения об авторах:**



**Бурдо Олег Григорьевич**, д.т.н., профессор, зав. каф. процессов, оборудования и энергетического менеджмента. Сфера научных интересов: тепломассообмен, нанотехнологии, энергоэффективность г.Одесса, Украина  
E-mail: [poem.onaft@gmail.com](mailto:poem.onaft@gmail.com)



**Кашкано Марьяна Анатольевна**, к.т.н., доцент кафедры ресторанного и оздоровительного питания ОНАПТ. Сфера научных интересов: усовершенствование технологий производства пищевых продуктов. г.Одесса, Украина  
E-mail: [poem.onaft@gmail.com](mailto:poem.onaft@gmail.com)





**Гаврилов Александр Викторович**  
к.т.н., доц. каф. технологии и оборудования производств и переработки продукции животноводства. Сфера научных интересов: процессы обезвоживания пищевых продуктов, энергоэффективность  
E-mail: [tehfac@mail.ru](mailto:tehfac@mail.ru)



**Левтринская Юлия Олеговна**, к.т.н., асс. кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента. Сфера научных интересов: экстрагирование, экоиндустрия АПК  
E-mail: [levtrinska@ukr.net](mailto:levtrinska@ukr.net)



**Терзиев Сергей Георгиевич**, д.т.н., председатель правления ПАО «Енни Фудз». Сфера научных интересов: экоиндустрия АПК, экстрагирование.  
E-mail: [pоеm.onaft@gmail.com](mailto:pоеm.onaft@gmail.com)



**Сиротюк Илья Вадимович**, аспирант кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента. Сфера научных интересов: процессы теплообмена, обезвоживание.  
E-mail: [ilyxin09@gmail.com](mailto:ilyxin09@gmail.com)



**Пилипенко Евгений Александрович**, инженер кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента ОНАПТ. Сфера научных интересов: экстрагирование, обезвоживание пищевых продуктов.  
E-mail: [pоеm.onaft@gmail.com](mailto:pоеm.onaft@gmail.com)