

## Energy Address Delivery Technologies and Thermal Transformations in Food Production

Burdo O.G.<sup>1</sup>, Sit M.L.<sup>2</sup>, Zikov A.V.<sup>1</sup>, Reznichenco D.N.<sup>1</sup>, Juravleov A. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Odessa National academy of food technologies, Odessa, Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Power Engineering of the ASM, Chisinau, Republic of Moldova

**Abstract.** In this article, energetic and technical paradoxes in food nanotechnologies and traditional approaches to evaluation of energy recourses using are considered. Hypotheses of improvement of food production energy technologies are formulated. Classification of principles of address delivery of energy to food raw materials elements is given. We had substantiated the perspective objectives for heat-pumps installations and biphasic heat-transfer systems. The energy efficiency of new technologies is compared on base of the number of energy impact. Principles of mass transfer modeling in extraction, dehydration and pasteurization combined processes are considered by food production example. The objectives of mathematical modeling of combined hydrodynamic and heat and mass transfer processes in modern energy technologies are set. The fuel energy conversion diagrams for drying, innovative installations on the base of thermal siphons, heat pumps and electromagnetic energy generators are represented. In this article, we illustrate how electromagnetic field, biphasic heat-transfer systems and heat pumps can be effective tools for energy efficiency technologies.

**Keywords:** energy, food technologies, modeling, heat pumps, heat pipes, electromagnetic energy supply.

### Tehnologiile de furnizare adresată a energiei și transformatoarelor de căldură în producerea produselor alimentare

Burdo O.G.<sup>1</sup>, Zicov A.V.<sup>1</sup>, Reznichenco D.N.<sup>1</sup>, Sit M.L.<sup>2</sup>, Juravleov A.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Academia națională de Tehnologii Alimentare din Odesa, Odesa, Ucraina

<sup>2</sup> Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

**Rezumat.** Se discută efecte energotehnologice paradoxale ale tehnologiilor alimentare și abordările tradiționale pentru evaluarea eficienței de utilizare a resurselor energetice. Sunt formulate ipotezele de perfecționare a tehnologiilor energetice la întreprinderile alimentare. Este înaintată clasificarea principiilor de aprovizionare adresată a energiei la elementele materiei prime de alimentare. Sunt fundamentate problemele pe termen lung pentru instalații cu pompe de căldură și sisteme bifazate de transfer de căldură. Este realizată comparația tehnologiilor energetice pe baza unui număr de similitudine – numărului de impact energetic. Pe exemplul obiectelor industriilor alimentare sunt studiate principiile de modelare ale proceselor de transfer de masă și de căldură la extracție, deshidratare și pasteurizare. Este trasată sarcina de modelare matematică a proceselor hidrodinamice și de schimb de masă și căldură ale energotehnologiilor inovatoare. Sunt prezentate scheme de conversie de energie a combustibilului în procesele de uscare, la instalațiile inovatoare pe bază de termosifoane și generatoare electromagnetice de energie. Este demonstrat, că câmpul electromagnetic pulsant, sistemele bifazate de transfer de căldură și pompele de căldură sunt instrumentul eficient de realizare a tehnologiilor energoeficiente.

**Cuvinte-cheie:** energie, tehnologii alimentare, modelare, pompe de căldură, tuburi termice, alimentare cu energie electromagnetică, industrie a produselor lactate, instalații de pasteurizare și răcire.

### Технологии адресной доставки энергии и термотрансформации при производстве продуктов питания

Бурдо О.Г.<sup>1</sup>, Шит М.Л.<sup>2</sup>, Зыков А.В.<sup>1</sup>, Резниченко Д.Н.<sup>1</sup>, Журавлев А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, Украина

<sup>2</sup> Институт Энергетики Академии наук Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

**Аннотация.** Обсуждаются энерготехнологические парадоксы пищевых технологий и традиционные подходы для оценки эффективности использования энергетических ресурсов. Формулируются гипотезы совершенствования энерготехнологий пищевых производств. Дана классификация принципов адресной доставки энергии к элементам пищевого сырья. Обоснованы перспективные задачи для теплонасосных установок и двухфазных теплопередающих систем. Проведено сравнение энергетической эффективности технологий на основе нового числа подобия – числа энергетического воздействия. На примере объектов пищевых производств рассмотрены принципы моделирования комбинированных процессов массопереноса при экстрагировании, обезвоживании и пастеризации. Поставлена задача математического моделирования комбинированных гидродинамических и тепломассообменных процессов инновационных энерготехнологий. Представлены схемы конверсии энергии топлива при сушке, инновационные установки на основе термосифонов, тепловых насосов и электромагнитных генераторов энергии.

Показано, что импульсное электромагнитное поле, двухфазные теплопередающие системы и тепловые насосы являются эффективным инструментом реализации энергоэффективных технологий.

**Ключевые слова:** энергия, пищевые технологии, моделирование, тепловые насосы, тепловые трубы, электромагнитный подвод энергии.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе производители продуктов питания сталкиваются с жесткими регламентациями по безопасности пищевых продуктов, удельной энергоемкости технологии и экологической чистоте предприятия [1-5]. Комплексное решение этих проблем перспективно для пищевых систем. Снижение количества потребленной энергии не только повысит энергетический КПД процесса и снизит себестоимость продукта, но и уменьшит уровень термического воздействия на продукт. В результате в продукте сохраняются термолабильные и биологически активные компоненты пищевого сырья. А это позволит выпускать пищевые продукты, которые станут отвечать требованиям функционального питания. В работе ставится задача найти способы энергетического воздействия непосредственно на отдельные частицы дисперсного материала, элементы пищевого сырья (влага, микроорганизмы, оболочки клеток, поры, капилляры и пр.). В результате ожидается существенное повышение эффективности пищевых технологий: снижение удельной энергоемкости, улучшение качества готового продукта, рост степени извлечения целевых компонентов сырья, повышение производительности и пр. Ставится задача

найти эффективные принципы, подходы для локальных действий, направленных на интенсивные, низкоэнергоемкие операции с пищевым сырьем, и, даже, с отдельными наноразмерными элементами этого сырья.

Решение поставленных задач связано с эффективным использованием современных принципов энергетического воздействия, учитывающих разные свойства отдельных структур сырья, с привлечением прогрессивных средств теплопередачи и термотрансформации. В этом плане ориентация была на электромагнитные источники энергии, тепловые трубы и тепловые насосы [6 - 12].

## 2. Формулировка проблемы

Основным процессом большинства пищевых технологий является термическая обработка. Именно этот процесс определяет качество готового продукта, затраты энергии и себестоимость его производства. Очевидны научно технические противоречия между растущими требованиями к качеству пищевого продукта, энергоемкости его производства и техникой тепломассопереноса. Ряд основных пищевых технологий парадоксально решают задачи использования энергетических ресурсов (табл. 1).

**Таблица 1. Энерготехнологические парадоксы пищевых производств.**

№	Задача	Традиционные решения	Гипотезы
1	Инактивация микроорганизмов	Энергия подводится ко всему объему продукта и горячим продуктом пастеризуется.	Возможности адресной доставки энергии непосредственно к микроорганизму.
2	Сушка сырья	Энергия подводится к промежуточному потоку, который переводит влагу продукта в пар.	Возможности адресной доставки энергии непосредственно к влаге в объеме продукта.
3	Сушка сырья	Вся удаляемая влага продукта переводится в паровую фазу.	Возможности удаления влаги в виде двухфазного потока.
4	Извлечение целевых компонентов	Растворение компонента экстрагентом и диффузия его в экстракт.	Возможности дополнительного переноса из межклеточного пространства и из клеток нерастворимых компонентов
5	Ректификация	Энергия дефлегмации и дистилляции не используется.	Возможность трансформации энергии дефлегмации и дистилляции тепловым насосом.
6	Вакуум - выпарка	Нет эффективных способов утилизации энергии вторичного пара.	Возможность трансформации энергии вторичного пара тепловым насосом.
7	Пастеризация	Нагрев продукта осуществляет парогенератор, а его охлаждение – холодильная машина.	Возможность замены парогенератора и холодильной машины тепловым насосом.

Выдвигается гипотеза, что решение этих противоречий лежит в плоскости поиска новых принципов организации теплообменных процессов, использовании уникальных возможностей комбинированных влияний на процессы переноса, формировании сложных комбинаций движущих сил, направленных на эффективное извлечение целевых компонентов из сырья. Самостоятельными и эффективными решениями проблемы снижения расхода энергетических ресурсов являются внедрение в технологии высокоэффективных теплопередающих систем (тепловых труб и термосифонов) и совершенных термодинамических трансформаторов тепловой энергии – тепловых насосов.

### 3. Методы анализа эффективности использования энергии

Представляется, что принципы оценки эффективности использования энергии оборудованием пищевых производств следует серьезно переосмыслить. Часто используемый тепловой КПД далеко не всегда представлятелен. Например, тепловой КПД пастеризатора считается как отношение энергии подведенной к продукту к энергии использованного пара. Фактически потерями считаются потери в окружающую среду. При таком подходе КПД пастеризатора составляет 95...97 %. Однако, подведенная к продукту энергия не является вся полезной. Логично считать полезной только ту энергию, которая потреблена непосредственно микроорганизмами и пошла на процесс инактивации. При таком подходе энергетический КПД пастеризационных аппаратов чрезвычайно низкий – 0,004 %. А более 99,9% расходуется практически на «порчу» пищевого продукта [9].

Аналогичная ситуация в оценке теплового КПД сушильных установок. Здесь расчет ведут как отношение энергии, которая физически необходима для перевода в пар влаги в продукте, к энергии, потраченной сушильным агентом. В инновационных сушилках, когда влага из продукта удаляется в виде пара с капельками жидкости [6, 10] такой подход абсурден. Тепловой КПД выпарных аппаратов при традиционных подходах составляет 85 %. Однако, можно ли не учитывать потери энергии с вторичным

паром? Даже в многоступенчатых вакуум-выпарных установках такие потери существенны.

Предлагается для сравнения энергетической эффективности шире использовать подходы, освоенные в энергетическом менеджменте, где учитывается расход энергии на единицу продукта (МДж/кг либо МДж/л и т.п.). Если сравниваются аппараты, использующие разные источники энергии, то можно считать энергетическую эффективность, выраженную приведенными материальными затратами. Известны подходы оценки эффективности сушилок параметром МДж на 1кг испаренной влаги. Однако для случаев, когда влага удаляется из объема продукта в виде тумана [6, 13], такой КПД будет не корректным.

Авторы экспериментально получили результаты по интенсификации массопереноса в разы и, даже, на порядки выше [13]. Полученные результаты объясняются тем, что в процессах сушки и экстрагирования с воздействием импульсного электромагнитного поля инициируется поток из капилляров и нанокapилляров [13]. Частота выбросов и число функционирующих капилляров растет с ростом мощности излучения –  $N$ . Поток массы  $j_2$  определяется эффективным коэффициентом массоотдачи  $\beta_p$  и разностью давлений в капилляре  $P_k$  и в потоке  $P_e$ .

Поток  $j_2$  создается мощной гидродинамической движущей силой, он турбулизует пограничный слой, и может быть на несколько порядков больше классического диффузионного потока  $j_1$ . Возникает проблема отразить в классических уравнениях массопереноса влияние этого потока. На основе принципов теории подобия предложен новый безразмерный комплекс – число энергетического действия, которое учитывает влияние электромагнитного поля (число  $Bu$ ). Это соотношение между энергией излучения и той энергией, которая необходима для аналогичных процессов в традиционных технологиях. Число  $Bu$  определяет, как энергетическую эффективность оборудования, так и режим массопереноса. До определенных значений числа  $Bu$  имеют место ламинарные режимы движения жидкости в капиллярных каналах твердой фазы. Число  $Bu$  может показывать условия перехода к более интенсивному массопереносу, который логично назвать

режимом турбулентной бародиффузии [6]. В общем виде число энергетического действия характеризует соотношение расходов энергии инновационной технологии ( $Q$ ) и базового варианта (традиционной технологии):

$$Bu = Q/Q_0.$$

Для анализируемых процессов методами теории подобия определены структуры моделей в обобщенных переменных и соотношения для расчета числа  $Bu$  (табл. 2).

**Таблица 2. Расчетные модели.**

Процесс	Число $Bu$	Модель процесса
Активация и инаktivация микроорганизмов	$Bu = N(\xi VC_p \Delta t \rho)^{-1}$	$F_0 = A \cdot Re^n Pr^m Bu^k$
Экстрагирование	$Bu = N(rwd^2 \rho)^{-1}$	$Sh = A \cdot Re^n Sc^m Bu^k$
Сушка	$Bu = N(rV\rho)^{-1}$	$Sh = A \cdot Re^n Sc^m Pe^p Bu^k$

В соотношениях принято:  $F_0$ ,  $Sh$ ,  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Sc$  – соответственно, числа Фурье, Шервуда, Рейнольдса, Прандтля, Шмидта;  $N$  – мощности излучения;  $V$  – объемный расход удаляемой влаги;  $r$  скрытая теплота фазового перехода;  $d$  – определяющий размер;  $\rho$  – плотность.

Применение технологий адресной доставки энергии при сушке сырья дает возможность значительно интенсифицировать процесс [6, 13].

Организация двухфазного потока в виде пара и мелкодисперсных капель воды из объема сырья приводит к результату, который на основе традиционного теплового КПД оценить нельзя (табл. 3). А число  $Bu$  такую оценку позволяет сделать. Базовый вариант (№1) – это традиционные конвективные сушилки, а конкретно для зерносушилок – №2. Модернизация сушилок

термосифонной системой тепловой утилизации – под номером 3. Сушилки (№4) отличаются тем, что в зоне предварительного нагрева продукта осуществляется адресная доставка энергии к продукту с помощью испарительных термосифонов. В сушилках (№5) такая адресная доставка энергии организована и в зоне сушки. Это серьезно снизило потери тепловой энергии с уходящими газами. Сушилки №4 и №5 рассматриваются как установки второго поколения.

Сушилки третьего поколения (№6 и №7), где энергия доставляется непосредственно к влаге в продукте, вообще не имеют общепринятого теплового КПД, а число  $Bu$  работает, и отражает тенденции развития сушильной техники [12].

**Таблица 3. Оценка энергетической эффективности сушильной техники.**

№	Принцип удаления влаги	МДж/кг удаленной влаги	Тепловой КПД, %	Число $Bu$
1	Базовые конвективные	6 - 8	0,3 - 0,38	2,6 – 3,5
2	Зерносушилки			
3	базовые 1 поколения	4,26 – 6,3	0,36 – 0,5	1,85 – 2,7
4	модернизированные 1 поколения	3,8 - 5,1	0,45 – 0,6	1,67 - 2,22
5	блочные 2 поколения	3,54	0,65	1,54
6	рекуперативные 2 поколения	2,7 - 2,88	0,8 – 0,85	1,18 - 1,25
7	3 поколения (достигнутый результат)	1,9	-	0,82
8	3 поколения (ожидаемый результат)	0,2	-	0,09

Число энергетического воздействия удачно обобщило базы экспериментальных данных в процессах инактивации, обезвоживания и экстрагирования [6]. Представляется, что число  $Bu$  может ответственно характеризовать энергетическую специфику всех задач, применяемых при адресной доставке энергии.

#### 4. Инновационные схемы сушки

С позиций сегодняшнего дня [6-14] можно так прогнозировать развитие технологий адресной доставки энергии при сушке сырья (рис. 1).

Рассмотрим инновационные теплотехнологии сушки на основе тепловых труб. В основе разработок лежат следующие гипотезы.

**Гипотеза 1.** Разделение теплоносителя на два потока, один из которых циркулирует по контуру «тепловой генератор – зона нагрева

продукта – тепловой генератор» и с помощью конденсаторов тепловых труб (ТТ) нагревает продукт перед сушкой, после чего в калорифере из ТТ греет воздух до температуры сушильного агента и возвращается в теплогенератор, а другой поток – горячий воздух из калорифера продувается сквозь продукт, увлажняется и выбрасывается в атмосферу, позволит до 40% теплоносителя пустить на рециркуляцию, что существенно снизит потери энергии с отработавшим теплоносителем. Конструкция зоны нагрева сырья на основе ТТ обеспечивает экологическую безопасность, организацию равномерного подвода энергии к продукту и эффективное его перемешивание и согласует темпы процессов тепло- и массопереноса. Тепловой КПД такой блочной сушилки повышается до 60 %.

Развитие эта техническая идея получила в гипотезе 2, что привело к конструкции рекуперативной сушилки.

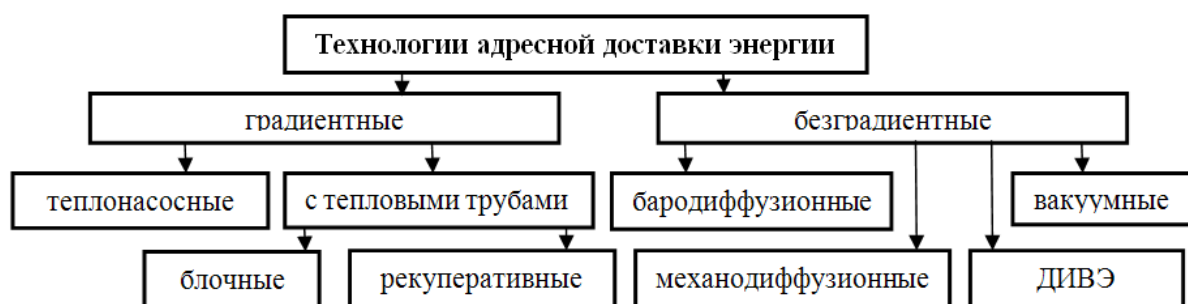


Рис. 1. Классификация технологий направленного энергетического действия.

**Гипотеза 2.** Если снять с воздуха задачу теплоносителя, а оставить ему функцию только диффузионной среды, организовать адресный подвод энергии к потоку зерна системой ТТ, испарители которых обогреваются топочными газами (или любым другим источником энергии), то можно полностью обеспечить предварительный нагрев зерна за счет энергии выбросов из зоны сушки, сократить время и энергетические затраты и гарантировать получение безопасного продукта.

Первые две гипотезы обуславливают переход на принципиально новые конструкции шахтных сушилок, по сути, речь идет про сушилки 2 поколения. Реализация 2 гипотезы позволит повысить тепловой КПД шахтной зерносушилки до 80 – 85 % [13].

Использование термосифонов позволяет решить серьезное научно-техническое противоречие, которое характерно для традиционных конвективных схем [13]. Для повышения коэффициентов тепло- и массообмена увеличивают скорость движения теплоносителя, т.е. массовый расход в сушильной камере. Теплоноситель готовится смешиванием газов с воздухом. Значительные объемы перемещаемого потока теплоносителя сопряжены с ощутимыми потерями энергии с отработавшим теплоносителем. Применение термосифонов резко снижает эти потери. Необходимые режимы обеспечиваются трансформацией теплового потока соотношением поверхностей испарительных и конденсационных зон термосифонов [13]. Но на этом возможности градиентных принципов сушки по снижению энергетических затрат исчерпываются.

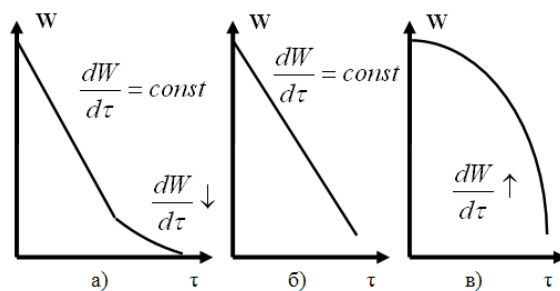
**Инновационные электромагнитные теплотехнологии сушки** реализуются в сушилках 3 поколения. Формулируется третья гипотеза.

**Гипотеза 3.** Применение при обезвоживании зерна адресной доставки энергии непосредственно к влаге в объеме продукта позволит инициировать мощный гидродинамический поток, который возникает при взаимодействии электромагнитного поля с полярными молекулами влаги в капиллярах. Это приведет к удалению воды не только в паровой фазе, а и туманом, что существенно повысит интенсивность тепломассопереноса за счет резкого снижения внутреннего диффузионного сопротивления, уменьшению энергетических затрат и времени процесса обезвоживания.

Третья гипотеза связана с радикально новыми способами организации процесса обезвоживания, с привлечением принципов нанотехнологий для развития бародиффузионных процессов [6, 13].

Последние годы характеризуются бурным развитием сушильной техники с электромагнитными источниками энергии (ЭИЭ). Вместе с тем, совершенствование разработок ведется на основе инженерной интуиции. Уровень понимания процессов взаимодействия продукта и электромагнитных волн значительно ниже представлений электрофизических явлений в генераторах электромагнитного излучения. Техника электромагнитных генераторов опередила теорию тепломассопереноса в процессе сушки при электромагнитном подводе энергии. Если учесть, что прикладные проблемы даже традиционной сушки не доведены до общепризнанных инженерных методов проектирования, то специфика сушки при электромагнитном подводе энергии практически не изучена. Однако успешное моделирование процессов сушки с ЭИЭ может дать мощный импульс широкого внедрения перспективной техники в пищевые технологии. По-особому выглядят и линии сушки. Если в традиционных схемах сушки выражены периоды постоянной и падающей скоростей, то в инновационных сушилках микроволновая энергии обеспечивает постоянную подпитку влагой поверхность продукта за счет ламинарной бародиффузии (рис. 2, а). Если реализуется режим турбулентной бародиффузии, то влага в виде тумана выбрасывается

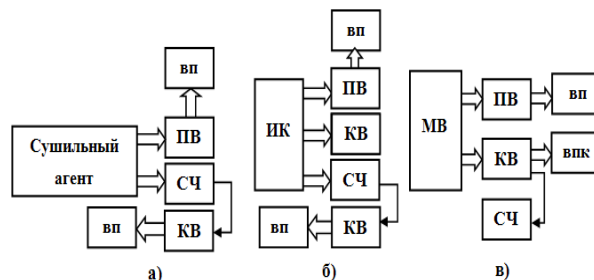
непосредственно в поток воздуха (рис. 2, б). Парадоксально, но процесс обезвоживания протекает с нарастающей скоростью обезвоживания. Такие картины получены экспериментально [13]. Наиболее низкие значения скорости сушки в первый период работы объясняется тем, что поверхностная влага блокирует процесс бародиффузии, которая начинает развиваться по мере удаления части поверхностной влаги.



а) – традиционная сушка, б) – ламинарная бародиффузия, в) турбулентная бародиффузия.

**Рис. 2. Линии удаления влаги.**

Важную роль играет и вид самой электромагнитной энергии (рис. 3).



а) – традиционная конвективная; б) – инфракрасная; в) – микроволновая.

**Рис. 3. Принципиальные схемы сушки.**

В традиционной конвективной схеме сушильный агент отдает энергию сначала поверхностной влаге (ПВ), затем сухой части продукта (СЧ), которая передает энергию влаге в капиллярах (КВ). Так протекает традиционная конвективная сушка (рис. 3, а), результатом которой считается поток влажного пара (ВП). В ИК – сушке (рис. 3, б) капиллярная влага удаляется частично непосредственно электромагнитной энергией, а частично так, как и конвективной сушке.

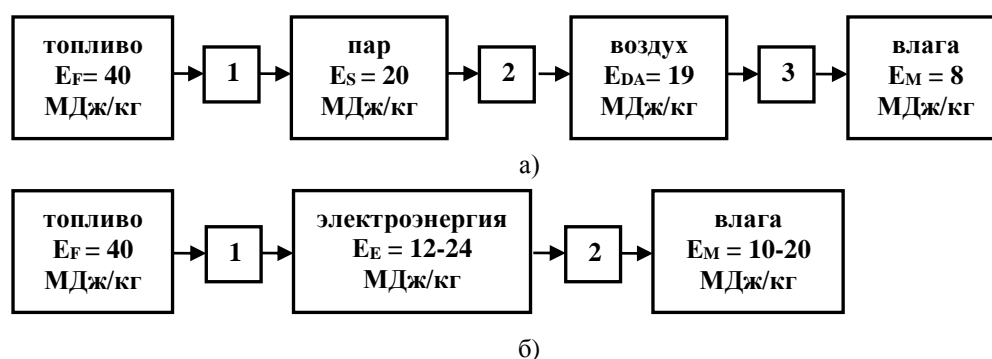
В случае микроволновой (МВ) сушки (рис. 3, в) из капилляров за счет бародиффузии может наблюдаться поток смеси влажного пара и капель воды (ВПК).

Состав такой смеси и характеризует удельные затраты энергии на процесс обезвоживания. Чем больше доля капель – тем меньше затрат энергии.

Подробно конверсия энергии топлива в элементах сушильных установок поясняется схемами (рис. 4).

Положительный эффект достигается за счет того, что в схеме МВ-сушки меньшее число трансформаторов энергии отсутствуют элементы транспорта энергии и выше значения эффективности использования энергии в МВ-генераторе по сравнению с традиционной конвективной сушкой.

В конвективной сушке конверсия энергии выглядит так. Преобразование энергии в схеме «топливо – водяной пар» проходит при КПД 50 %, а при КПД сушки в 40 % полезная энергия составляет 8 МДж. Это эквивалентно 3 кг удаленной из продукта влаги. В предлагаемой сушилке с электромагнитным подводом энергии полученный результат (приведенный к первичному ресурсу, топливу) вдвое выше (табл. 4), а технически возможный уровень составляет 50 кг влаги.



а) – традиционные конвективные технологии: 1 – парогенератор; 2 – калорифер; 3 – продукт; б) – микроволновая сушка: 1 – электростанция; 2 – МВ-генератор

Рис. 4. Конверсия энергии в сушильных технологиях (все параметры приведены к 1 кг топлива).

Таблица 4. Энергетика сушильных технологий.

Схема	Энергия 1 кг топлива	Полезная энергия	Количество удаленной влаги
Традиционная	40 МДж	8 МДж	3 кг
Микроволновая	40 МДж	12-16 МДж	6 кг

Электродиффузионные модели сушильных технологий приведены в табл.5. Схемы иллюстрируют потоки влаги для разных режимов работы сушилок.

В традиционной схеме (табл.5, №1) поток должен преодолеть внутридиффузионное сопротивление ( $R_k$ ) и конвективное сопротивление от поверхности продукта в окружающую среду ( $R_c$ ). Результирующий диффузионный поток –  $J_d$ . В схеме с электромагнитными генераторами энергии возникает мощный бародиффузионный поток ( $J_b$ ), который преодолевает гидродинамическое сопротивление ( $R_b$ ).

В случае ламинарной бародиффузии (табл. 5, №2) поток доставляет компоненты к поверхности продукта, что обеспечивает стабильный массоперенос от поверхности

( $J_c$ ). При этом  $J_c > J_d$ . В случае турбулентной бародиффузии (табл.5, №3) поток ( $J_b$ ) способен доставлять компоненты прямо в среду, параллельно традиционному потоку  $J_d$ . При этом  $J_b \gg J_d$ .

Условием функционирования бародиффузионного потока являются следующие факторы:

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



**Таблица 5. Электродиффузионные модели сушильных технологий.**

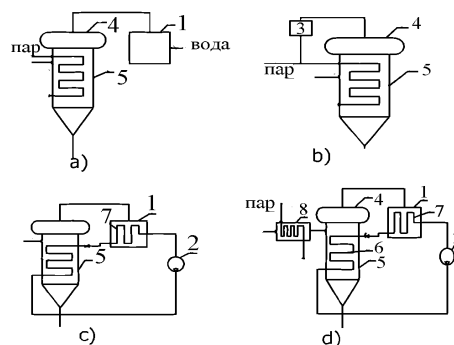
№	Схема массопереноса	Поля
1	$\rightarrow R_k \rightarrow R_c \rightarrow J_d$	$\begin{matrix} P \\ \downarrow \\ t \\ \uparrow \end{matrix}$
2	$\begin{matrix} \rightarrow R_k \\ \rightarrow R_b \end{matrix} \rightarrow R_c \rightarrow J_c$	$\begin{matrix} P \\ \uparrow \\ t \\ \uparrow \end{matrix}$
3	$\begin{matrix} \rightarrow R_k \\ \rightarrow R_b \end{matrix} \rightarrow R_c \rightarrow J_d$ $\rightarrow J_b$	$\begin{matrix} P \\ \uparrow \\ t \\ \uparrow \end{matrix}$

### 5. Теплонасосная вакуум-выпарная установка.

Одним из ключевых процессов производства концентрированных плодово-ягодных экстрактов является выпаривание в вакуум-выпарном аппарате. Этот процесс характеризуется высоким энергопотреблением. Основным методом снижения энергопотребления в ВВУ является использование энергии вторичного пара. Традиционно для этого используются многоступенчатые выпарные установки (МВУ). Однако для линий небольшой производительности такое решение характеризуется высокой удельной материалоемкостью и капитальными затратами. Для использования энергии вторичного пара в одноступенчатой выпарной установке необходимо применить систему термотрансформации ее на более высокий уровень. При небольших значениях температурных депрессий, эффективной может быть и схема термотрансформации с механической рекомпрессией вторичного пара (рис. 7б). В такой схеме вторичный пар, выходящий из парового сепаратора 4, сжимается до давления греющего пара при помощи компрессора и подается в греющую камеру 5. Выпускаемые промышленностью установки с механической рекомпрессией работают с перепадами температур в аппарате и греющей камере до 15 °С. Удельные затраты энергии в таких установках составляют 350–400 кДж/кг испаренной влаги. Другой путь

использования энергии вторичного пара это применение теплонасосной ВВУ (рис. 7с).

В этой установке для использования энергии конденсации вторичного пара в конденсаторе 1 расположен испаритель теплового насоса 7. Для нагрева продукта и испарения растворителя в греющей камере 5 расположен конденсатор теплового насоса 6. Таким образом, в этой установке трансформация энергии вторичного пара осуществляется при помощи машины, реализующей замкнутый испарительно-конденсационный цикл. Естественным представляется вопрос об экономической эффективности применения той или иной схемы термотрансформации. Удельное энергопотребление описанных систем значительным образом зависит от технологических условий проведения процесса. Для численного сравнения эффективности описанных схем рассмотрим сезонное потребление тепловой и электрической энергии линией производства концентрированных плодово-ягодных экстрактов производительностью 1 т/ч (таб. 6). В линии с традиционной ВВУ (рис. 7а) основным потребителем тепловой энергии является ВВА, а основным потребителем электрической энергии является вакуум-насос.



*а – базовая схема, б – схема с механической рекомпрессией пара, с – схема с тепловым насосом, d – схема с тепловым насосом и дополнительным подводом тепловой энергии; 1 – конденсатор вторичного пара, 2 – компрессор теплового насоса, 3 – механический компрессор вторичного пара, 4 – паровой сепаратор, 5 – греющая камера, 6 – конденсатор теплового насоса, 7 – испаритель теплового насоса.*

**Рис. 7. Схема вакуум выпарного аппарата используемого в линии производства концентрированных плодово-ягодных экстрактов.**



**Таблица 6. Сравнение годовых затрат на производство концентрированных плодово-ягодных экстрактов.**

	Q(кВт)	N(кВт)	Стоимость тепловой энергии (Украина, 2015, дол. США)	Стоимость электроэнергии (Украина, 2015, дол. США)	Суммарные затраты (Украина, 2015, дол. США)
Базовая схема	4647	33	218217	2206	220424
С механической рекомпрессией пара	656	791	30838	51506	82345
С тепловым насосом	-	1986	-	129323	129323
С тепловым насосом и дополнительным подводом тепловой энергии	124	618	5833	40282	46116

В отличие от традиционной схемы концентрирования продуктов в вакуум-выпарных установках применение теплонасосной ВВУ (рис. 7с) позволяет не только снизить энергозатраты на процесс концентрирования, но и уйти от необходимости использования охлаждающей воды и греющего пара. Использование такой схемы в технологической линии значительно увеличивает потребление электрической энергии, но суммарные затраты снижаются почти вдвое. Еще более существенного снижения суммарных затрат на энергообеспечение линии применив схему (рис. 7b) в которой используется греющий пар из котельной в сочетании со сжатым вторичным паром. Использование предварительного подогрева продукта в сочетании с подбором оптимальных температур испарителя и конденсатора в системе с тепловым насосом (рис. 7d) позволяет на 50 % снизить стоимость потребляемой энергии, относительно схемы с механической рециркуляцией вторичного пара.

#### **6. Пастеризационно-охладительные теплонасосные установки для молока**

Пастеризационно-охладительные установки для молока уже были рассмотрены в [8, 15]. В данной работе проведено упрощение путем удаления одного из теплообменников, а испарители для получения ледяной воды для летнего режима работы включены по воде последовательно.

Испаритель 9а (рис.8) выполняет функцию регулятора теплового режима испарителя 8 (первой ступени охладителя молока), что реализуется путем стабилизации температуры молока на выходе теплообменника 8. В теплый период года работает теплообменник 8а, который выполняет ту же функцию. Стабилизация температуры на входе в теплообменник 12 необходима для того, чтобы одновременно со стабилизацией температуры молока на входе в теплообменник 8 обеспечить нахождение температуры воды после теплообменника 12 в заданном диапазоне. Параллельно с газоохладителем 2 включен теплообменник 2а для производства горячей воды, расход хладагента через который определяет номинальный режим работы теплового насоса. В летний период времени вода охлаждается последовательно двумя испарителями 9а и 8а, на что указывает буква А над линиями обозначений воды.

Базовым элементом в установке является газоохладитель 2, расход хладагента через него определяет производительность по пастеризуемому молоку. Расход хладагента через испарители 8 и 9 определяется необходимой теплотой для охлаждения молока.

Расход хладагента через испаритель 9а определяется из условия обеспечения нагрева молока и его охлаждения, а также стабилизации температуры молока перед испарителем 8. При этом газоохладитель 2а, включенный параллельно газоохладителю 2, совместно с испарителем 9а выполняет

функцию стабилизации режима пастеризации и одновременно производит горячую воду и ледяную воду.

Составим уравнение теплового баланса для контура нагрева и охлаждения молока:

$$\begin{aligned} G_{2m\_in} \cdot c_m \cdot (t_{2m\_in} - t_{2m\_out}) = \\ G_{2m\_in} \cdot c_m \cdot (t_{12m\_in} - t_{12m\_out}) + \dots \\ + G_{2m\_in} \cdot c_m \cdot (t_{8m\_in} - t_{9m\_out}) \end{aligned} \quad (1)$$

В этом уравнении цифровые и буквенные индексы при расходе молока  $m$  и температурах молока обозначают входы и выходы соответствующих теплообменников. Уравнение теплового баланса для теплообменника 12 имеет вид:

$$\begin{aligned} G_{2m\_in} \cdot c_m \cdot (t_{12m\_in} - t_{12m\_out}) = \\ G_{2w\_in} \cdot c_w \cdot (t_{12w\_out} - t_{12w\_in}) \end{aligned} \quad (2)$$

Индекс “w” при обозначениях расхода и температуры означает «вода». Как видно из рисунка, для выбранных значений температур молока уравнение теплового баланса (2) выполняется.

Условие, которому удовлетворяют теплоты, выделяемые на газоохладителе 2 и испарителях 8 и 9, связаны зависимостью

$$\frac{G_2 \cdot \Delta h_2}{G_8 \Delta h_8 + G_9 \Delta h_9} = \frac{t_{2m\_in} - t_{2m\_out}}{t_{8m\_in} - t_{9m\_out}}. \quad (3)$$

Уравнение теплового баланса для контура циркуляции хладагента имеет вид:

$$G_2 \Delta h_2 + G_{2a} \Delta h_{2a} = (G_2 + G_{2a}) (\Delta h_{91} + \Delta h_{34}) \quad (4)$$

Где  $G_2, G_{2a}$  – массовые расходы хладагента через газоохладители 2 и 2а, а  $\Delta h_2, \Delta h_{2a}$  – перепады энтальпий на этих газоохладителях,  $\Delta h_{91}$  – перепад энтальпий на участке схемы между точками 1 и 9,  $\Delta h_{34}$  – перепад энтальпий на компрессоре.

Массовые расходы хладагента через испарители и газоохладители удовлетворяют условию:

$$G_2 + G_{2a} = G_8 + G_9 + G_{8a} + G_{9a} \quad (5)$$

Расход хладагента через испаритель 9а должен удовлетворять условию, см. ниже (уравнение теплового баланса)

$$G_{w12} \Delta t_{w12} = G_{8a} \Delta h_{9-10}, \quad (6)$$

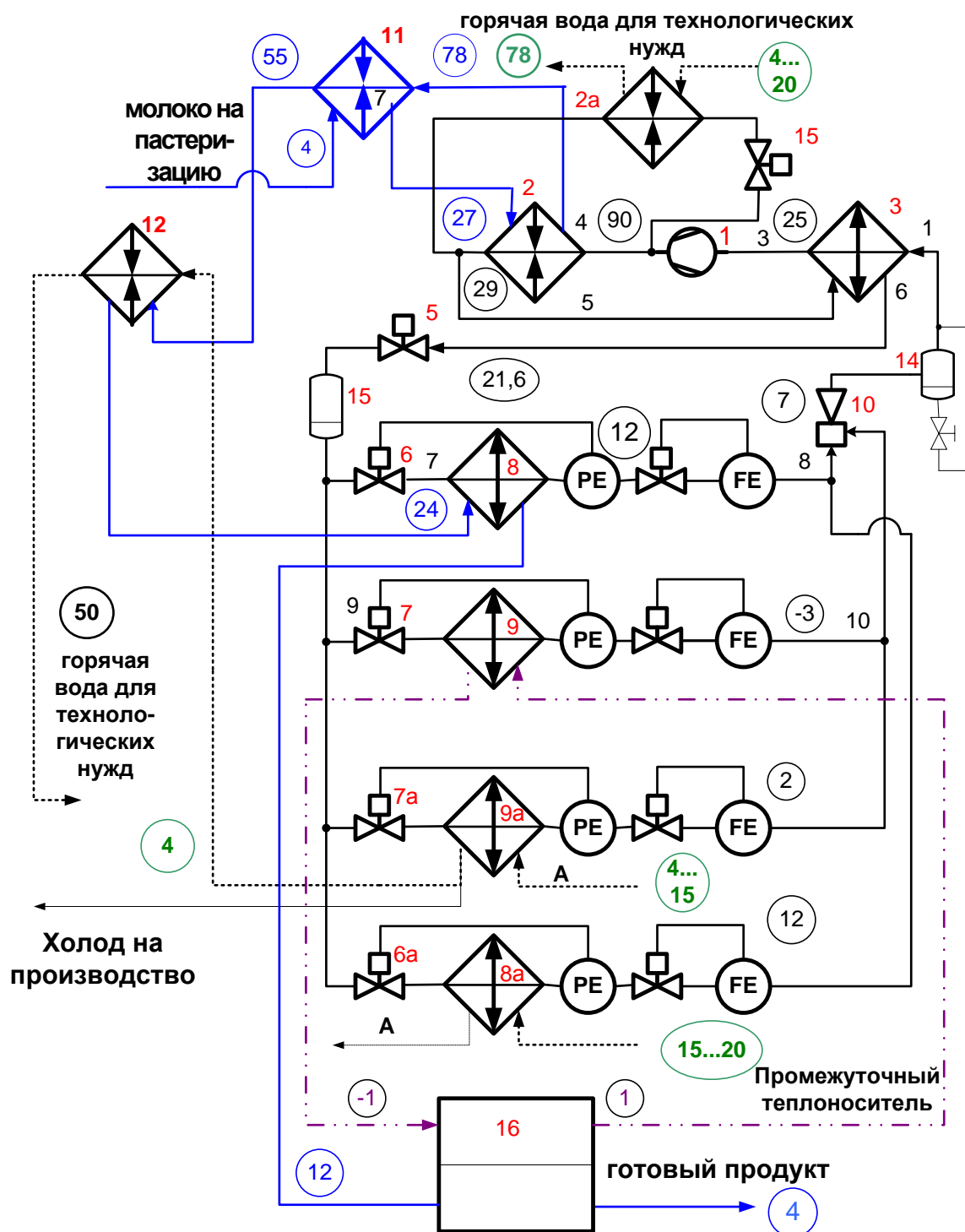
Где  $\Delta h_{9-10}$  – перепад давлений между точками 10 и 9 (рис.2),  $G_{w12}, \Delta t_{w12}$  – расход воды через теплообменник 12 и перепад температур воды на теплообменнике 12. Исходя из выполнения условий (1-6) и происходит регулирование режима работы теплонасосной пастеризационно-охладительной установки.

Сравним энергетические показатели пастеризационно-охладительной установки производительностью 10 т/час и новой теплонасосной пастеризационно-охладительной установки.

Исходные данные: для нагрева- охлаждения 10000кг молока в час на установке (<http://vp mash.ru/catalog/pasterizatsionnoohladi t elnie-ustanovki/plastinchataya-pasterizatsionnoohladi telnaya-4.html>)

требуется: 150 кг/час пара с температурой 135-145°C, 15000 кг/час воды с температурой 86°C, 20000 кг/час ледяной воды с температурой 1 °C, мощность электропривода котельных установок, водяных насосов для подачи горячей воды при этом ориентировочно составит около 25 кВт. Для работы серийной установки требуются паровой и водогрейный котлы, установка для получения ледяной воды, у которой ориентировочное потребление электроэнергии может составить до 60 кВт.

Для установки, рассматриваемой в данной статье, на 10000 кг/час молока вырабатывается 15000 кг/час воды с температурой 50°C, ~4000 кг/час воды с температурой 78°C, ~2000 кг/час ледяной воды с температурой 2 °C, а мощность электропривода компрессора составляет ~150 кВт. Для энергообеспечения предлагаемой установки требуется только электрическая энергия. По сравнению с серийной установкой, для новой установки не требуется природный газ. Таким образом, снижаются эксплуатационные затраты на котлы, и расход энергии на льдогенератор.



Условные обозначения на рис.8. Числа в кружках значения температур, черные непрерывные – хладагент, синие непрерывные – молоко, зеленые (точечная линия) – вода, цифры красного цвета – обозначения номера аппаратов, линии коричневого цвета – промежуточный теплоноситель (с низкой температурой замерзания). 1- компрессор, 2, 2а - газоохладители, 8, 9, 8а, 9а – испарители, 11, 12 – рекуперативные теплообменники, 10 – эжектор, 14, 15 – сборники хладагента, 16 - блок промежуточного контура для теплоносителя охлаждения молока.

**Рис.8.** Гидравлическая схема пастеризационно-охладительной установки с тепловым насосом

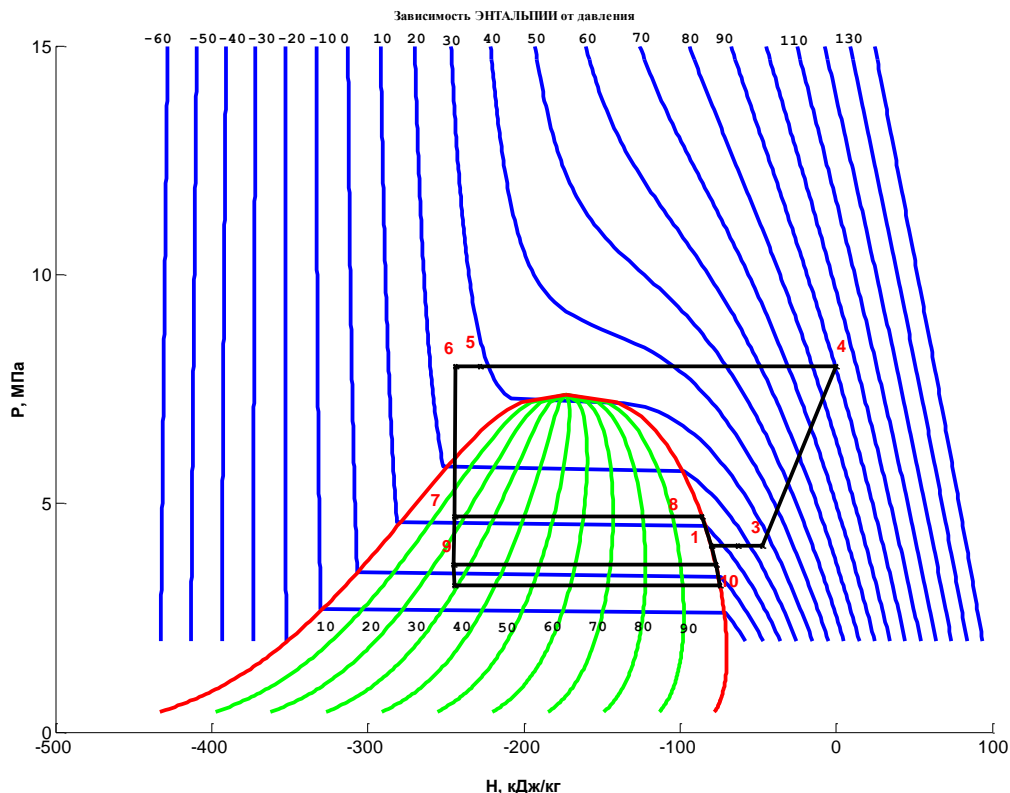


Рис. 9. Термодинамический цикл теплового насоса в H-P координатах.

При применении на заводе газопоршневой установки (ГПУ), работающей на биогазе, полученном из отходов молочного производства, можно обеспечить значительное снижение стоимости электроэнергии для теплового насоса, а также использовать в летний период теплоту, вырабатываемую ГПУ, для абсорбционной холодильной машины. При этом отпадет необходимость в покупке «внешней» электроэнергии для нужд пастеризации и охлаждения продуктов.

#### Выводы.

1. Использование современных средств подвода энергии в технологиях АПК позволяет эффективно расходовать ресурсы и реализовывать мягкие режимы обработки сырья, т.е. повысить как энергоэффективность, так и качество готового продукта. Теплонасосные системы в вакуум-выпарных установках обеспечивают высокие функциональные качества готового продукта при уменьшении затрат энергии на их производство на треть.
2. Средства доставки электромагнитной энергии при согласованном сочетании режимных параметров силовой электроники

и структуры сырья обеспечивают снижение энергоемкости сушки в разы, а, иногда и на порядок. Такое комбинированное воздействие на влагу непосредственно в объеме продукта приводит к появлению параллельно с диффузионным потоком и гидродинамического потока. Суммарная мощность потока оказывается на порядки большей. Для обобщения экспериментальных данных по тепломассообмену в условиях электромагнитных полей предложено число энергетического действия.

3. По сравнению с серийной пастеризационно-охладительной установкой, для описанной в данной статье установки не требуется природный газ. Таким образом, снижаются эксплуатационные затраты на котлы, и расход электроэнергии на льдогенератор, что значительно компенсирует увеличение расхода электроэнергии.

4. При применении на заводе газопоршневой установки (ГПУ), работающей на биогазе, полученном из отходов молочного производства, можно обеспечить значительное снижение стоимости электроэнергии для теплового насоса, а также использовать в летний период теплоту, вырабатываемую ГПУ, для абсорбционной холодильной машины. При этом отпадет

необходимость в покупке «внешней» электроэнергии для нужд пастеризации и охлаждения продуктов.

### Литература (References)

1. Nada Smigic, Ilija Djekic, Margarida Liz Martins, Ada Rocha, Nikoleta Sidiropoulou, Eleni P. Kalogianni, The level of food safety knowledge in food establishments in three European countries // Food Control, Volume 63, May 2016, Pages 187-194, ISSN 0956-7135
2. Chaminda N. Walpita, Patrick Sorgeloos, Iddya Karunasagar, K.K.D.S. Ranaweera, Mieke Uyttendaele, Elien De Boeck, Liesbeth Jacxsens, International Conference of Sabaragamuwa University of Sri Lanka 2015 (ICSUSL 2015) Challenges in Food Safety as Part of Food Security: Lessons Learnt on Food Safety in a Globalized World // Procedia Food Science, Volume 6, 2016, Pages 16-22, ISSN 2211-601X
3. R.N. Pereira, A.A. Vicente, Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing // Food Research International, Volume 43, Issue 7, August 2010, Pages 1936-1943, ISSN 0963-9969
4. Nevenka Hrovatin, Nives Dolšak, Jelena Zorić, Factors impacting investments in energy efficiency and clean technologies: empirical evidence from Slovenian manufacturing firms // Journal of Cleaner Production, Volume 127, 20 July 2016, Pages 475-486, ISSN 0959-6526
5. Steven Meyers, Bastian Schmitt, Mae Chester-Jones, Barbara Sturm, Energy efficiency, carbon emissions, and measures towards their improvement in the food and beverage sector for six European countries // Energy, Volume 104, 1 June 2016, Pages 266-283, ISSN 0360-5442
6. Burdo O.G., *Pischevyie nanoenergotehnologii* [Food nanoenergytechnologies] – Herson, 2013 – 294p.
7. Datta A.K. Handbook of Microwave Technology for Applications / A.K. Datta, R.C. Anantheswaran. – Marcel Dekker, Inc. 2001. – 511p.
8. Sit M.L., Sit B.M., Burciu V.I., Ioşer A.M. [Upravlenie gazoohladiatelym teplovogo nasosa po kriteriu minimuma poteri exergii]. Problemele energeticii regionale, N1 (25) 2015, pp.47-56. (In Russian).
9. Lopez-Avila V. Microwave-Assisted Extraction of Organic Compounds from Standard Reference Soils and Sediments / V. Lopez-Avila, R. Young // Analytical Chemistry. – 1994. – 66. – P. 1097-1106.
10. Zarein M, Samadi SH, Ghobadian B. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. J Saudi Soc Agric Sci 2015;14:41-7
11. Sorour H, Mesery HE. Effect of microwave and infrared radiation on drying of onion slices. Int J Res Appl Nat Soc Sci 2014; 2(5):119-130.
12. Sharifian F, Modarres-Motlagh A, Komarizade MH, Nikbakht AM. Colour change analysis of fig fruit during microwave drying. Int J Food Eng 2013; 9(1):107-14.
13. Burdo O.G. *Evolutsiya sushilnykh ustanovok* [Dryers evolution] – Odessa: Poligraf, 2010 – 368p.
14. Burdo O.G., Terziev S.G., Levtrinskaya J.O. Energetika ekoindustrii pischevykh kontsentratsiy [Energetics of Eco-Industry of Food Concentrates Production] / Problemele energeticii regionale, Chisinau, 2015. – #2 (28) – pp.69–79 (In Russian).
15. Şit M.L., Şit B.M. Instalație cu pompa de căldură multifuncțională pentru fabricii de procesare a laptei. Problemele Energeticii Regionale 2015, 28 (2), 53-58, ISSN 1859-0070, [http://journal.ie.asm.md/assets/files/07\\_02\\_28\\_2015.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/07_02_28_2015.pdf)

### Сведения об авторах:



**Бурдо Олег Григорьевич** – заслуженный деятель науки и техники Украины, д.т.н., профессор, заведующий кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента ОНАПТ. Область научных интересов: тепломассообмен, энергоэффективное оборудование, получение новых неэнергоемких продуктов.  
E-mail: [terma\\_onaft@rambler.ru](mailto:terma_onaft@rambler.ru)

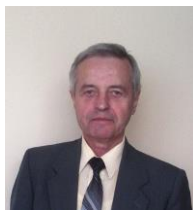


**Резниченко Дмитрий Николаевич** – аспирант кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента Одесской национальной академии пищевых технологий. Сфера научных интересов: теплонасосные системы, тепломассообменное оборудование, энергоэффективные процессы пищевых производств. E-mail: [dmutr0@yahoo.com](mailto:dmutr0@yahoo.com)



**Зыков Александр Викторович** – к.т.н., доцент кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: тепловые трубы и тепловые насосы, системы адресной доставки энергии и аппараты на их основе, моделирование процессов тепло-массообмена, оптимизация режимных и конструктивных параметров оборудования АПК.

E-mail: [zav380@yahoo.com](mailto:zav380@yahoo.com)



**Журавлев Анатолий Александрович** – кандидат технических наук, в.н.с. лаборатории «Энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии» института энергетики АНМ. Область научных интересов: микропроцессорные системы управления, промышленная автоматика.

E-mail: [juravleov\\_a@mail.ru](mailto:juravleov_a@mail.ru)



**Шит Михаил Львович** – к.т.н., в.н.с., доцент-исследователь лаборатории «Энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии». Область научных интересов: тепловые насосы, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, E-mail: [mihail\\_sit@mail.ru](mailto:mihail_sit@mail.ru)