

## Technologies of Selective Energy Supply at Evaporation of Food Solutes

Burdo O.G., Burdo A.K., Sirotyuk I.V.<sup>1</sup>, Pour D.R.<sup>2</sup>

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

Odessa, Ukraine

<sup>2</sup>”Davarrostamipour” firm

Tehran, Iran

**Abstract.** The aim of the research is to create innovative evaporating equipment that can produce concentrates with a high content of solids, with a low level of thermal effects on raw materials. The significance of the solution of technological problems of the key process of food technologies - concentration of liquid solutions (juices, extracts, etc.) is shown. Problems and scientific contradictions are formulated and the hypothesis on using of electromagnetic energy sources for direct energy transfer to solution's moisture has been offered. The prospects of such an energy effect are proved by the energy management methods. The schemes of fuel energy conversion for the conventional thermal concentration technology and the innovative plant based on the electromagnetic energy generators are presented. By means of the similarity theory the obtained model is transformed to the criterial one depicted kinetic of evaporation process at the electromagnetic field action. The dimensionless capacity of the plant is expressed by the dependence between the Energetic effect number and relative moisture content. The scheme of automated experimental system for study of the evaporation process in the microwave field is shown. The experimental results of juice evaporation are presented. It has been demonstrated that the technologies of selective energy supply represent an effective tool for improvement of juice concentration evaporative plants. The main result of the research is design of the evaporator that allows reaching juice concentrates with °brix 95 at the temperature as low as 35 °C, i.e. 2...3 times superior than traditional technologies.

**Keywords:** energy, food technologies, simulation, juice concentrating, evaporation, electromagnetic energy supply.

### Tehnologia de furnizare selectivă a energiei în procesele de evaporare a apei din soluțiile nutritive

Burdo O.G.<sup>1</sup>, Burdo A.C.<sup>1</sup>, Sirofiuk I.V.<sup>1</sup>, Pur D.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Academia Națională a Tehnologiilor de Alimentare din Odesa

Odesa, Ucraina

<sup>2</sup>Firma “Davarrostamipour”

Teheran, Iran

**Rezumat.** Scopul investigației – crearea utilajului inovațional de evaporare, apt de a produce concentrate cu impact termic redus asupra materiei prime cu o cotă ridicată a componentei uscate solide. Se indică la actualitatea soluționării problemelor tehnologice pentru procesul cheie a tehnologiei de alimentare – obținerea soluțiilor concentrate din soluții lichide (sucuri, extracte, etc.). Se prezintă rezultatele analizei tehnologiilor tradiționale utilizate în echipamentele de evaporare. Sunt formulate problemele și contradicțiile științifice existente în acest domeniu. Se propune soluția tehnică la baza căreia este ipoteza posibilității utilizării surselor de energie electromagnetice pentru furnizarea vizată a energiei direct la umiditatea din soluție. Cu utilizarea metodelor de management energetic s-a dovedit perspectiva acestui tip de acțiune energetică pentru confecționarea astfel de utilaje. Se prezintă schemele de conversie a energiei combustibilului în cazul utilizării tehnologiei tradiționale termice de ridicare a concentrației și pentru utilajul inovațional, care funcționează în baza generatoarelor de energie electromagnetice. S-a examinat modelul parametric și termofizic al procesului de evaporare în diapazonul de microunde în vid din aparatul de evaporare. Este prezentată schema ștandului computerizat pentru cercetarea procesului de evaporare în diapazonul de microunde. Se prezintă rezultatele cercetărilor experimentale a procesului de evaporare a sucului. S-au obținut substanțe concentrate a sucului de rodie cu indicele brix 85. Temperatura aburului la ieșirea din aparat nu a depășit valoarea de 35 °C. S-a dovedit, că tehnologia de furnizarea a energiei în mod selectiv se prezintă în calitate de procedeu eficient de sporire a performanței aparatelor de evaporare ce se utilizează pentru producerea sucurilor concentrate.

**Cuvinte-cheie:** energie, tehnologie alimentară, simulare, concentrare a sucului, energie electromagnetice.

**Технологии селективного подвода энергии при выпаривании пищевых растворов**

**Бурдо О.Г., Бурдо А.К., Сиротюк И.В.<sup>1</sup>, Пур Д.С.<sup>2</sup>**

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

Одесса, Украина

<sup>2</sup>Фирма “Davarrostamipour”

Тегеран, Иран

**Аннотация.** Цель исследований – создание инновационного выпарного оборудования, которое может производить концентраты с высоким содержанием сухих веществ, при низком уровне термического воздействия на сырье. Показана актуальность решения технологических проблем ключевого процесса пищевых технологий – концентрирования жидких растворов (соков, экстрактов, пр.). Анализируются энерготехнологии традиционных выпарных аппаратов. Формулируются проблемы и научные противоречия. Предлагается техническое решение, в основе которого гипотеза о возможности использования электромагнитных источников энергии для адресной доставки энергии непосредственно к влаге в растворе. Методами энергетического менеджмента показана перспективность такого вида энергетического воздействия. Представлены схемы конверсии энергии топлива при традиционной технологии термического концентрирования и инновационной установки на основе электромагнитных генераторов энергии. Рассмотрены параметрическая и теплофизическая модели процесса выпаривания в микроволновом вакуум-выпарном аппарате. Поставлена задача и проведено аналитическое моделирование теплового состояния элементов такого аппарата при воздействии электромагнитного поля. Методами теории подобия полученная модель трансформирована в критериальную, которая описывает кинетику процесса выпаривания в условиях электромагнитного поля. Безразмерная производительность аппарата выражена зависимостью от числа энергетического воздействия и безразмерного параметрического комплекса – относительного объемного влагосодержания. Приведена схема компьютеризированного стенда для исследования процесса выпаривания в микроволновом поле. Даны результаты экспериментального исследования процесса выпаривания сока. Показано, что технологии селективного подвода энергии являются эффективным инструментом совершенствования выпарных аппаратов для концентрирования соков. Основным результатом работы определяется тем, что создан выпарной аппарат, который позволяет при температурах до 35 °С получать концентраты соков до 95. А это в 2-3 раза выше, чем в традиционных технологиях.

**Ключевые слова:** энергия, пищевые технологии, моделирование, концентрирование соков, выпарка, электромагнитный подвод энергии.

### **1. Введение.**

Современные пищевые технологии развиваются на основе концепции функционального питания, важное место в которой отводится сокам. Сокам посвящена обширная научно-техническая литература. Подробно для большого количества соков рассмотрены вопросы технологии их производства [1 – 4], медицинские и лечебно-профилактические аспекты [5]. Научные основы концепции функционального питания достаточно глубоко проработаны [6 – 11].

На рынке представлены соки прямого отжима и восстановленные соки. Последние производятся из концентрированного сока и питьевой воды. Концентрированный сок приобретает все большую популярность. Это сок, получаемый вследствие удаления из сока прямого отжима части воды. В больших объемах производится восстановленный сок – сок, полученный из концентрированного сока или сока прямого отжима и питьевой воды. Производителей концентрированный сок привлекает следующими качествами: он дольше сохраняет свою пищевую ценность, требует меньших объемов для хранения и

снижает затраты при транспортировке. Особенно важен этот фактор в импортных и экспортных операциях. Вместе с тем, технологии концентрирования соков требуют модернизации.

### **2. Формулировка проблемы и постановка задачи исследования.**

В подавляющем большинстве технологии концентрированных соков основаны на процессах термической обработки. Воду из сока прямого отжима удаляют в вакуум-выпарных аппаратах. В значительной степени этот процесс определяет качество готового продукта, затраты энергии и себестоимость его производства. Именно здесь проявляются научно технические противоречия между растущими требованиями к качеству пищевого продукта, энергоемкостью его производства и техникой тепломассопереноса. Стремление повысить содержание сухих веществ в концентрате связано с необходимостью больших затрат энергии и решении вопросов интенсификации процессов теплопередачи, что в аппаратах работающих в условиях вакуума проблематично. Сохранение пищевой

ценности сырья требует снижения уровня давлений при выпарке, что имеет технические ограничения. Поэтому для разных пищевых систем целесообразны значения предельных концентраций сока разные и ограничены и по термодинамическим и по экономическим факторам. Для случаев, когда необходимо существенно повысить концентрацию сока остается только один способ – выпаривание в условиях вакуума. Вместе с тем, для сохранения качества сырья традиционные теплотехнологии выпарки необходимо совершенствовать.

В работе формулируется гипотеза: «отличия в электрофизических свойствах составляющих сока может использоваться для направленного подвода электромагнитной энергии непосредственно к воде, эффективного расхода энергии только на фазовый переход, что исключит все проблемы, связанные с теплопередачей в сгущенных растворах».

Основным ресурсом по предложенной гипотезе становится электроэнергия, а это требует объективной предварительной оценки эффективности схемы, сравнение ее с традиционными технологиями.

### **3. Системный анализ инновационной электротепловой технологии выпарки.**

В работе ставится задача найти способы энергетического воздействия непосредственно на влагу в жидкой пищевой системе. В результате ожидается существенное повышение эффективности технологий концентрирования: снижение удельной энергоемкости, улучшение качества готового продукта, повышение производительности и пр.

Решение поставленных задач связано с эффективным использованием современных принципов энергетического воздействия, учитывающих разные свойства отдельных структур сырья, с привлечением прогрессивных средств - электромагнитных источников энергии [12].

Для пояснения предложения рассмотрим теплофизические модели традиционной (рис. 1) и инновационной (рис. 2) выпарки. В классических вакуум-выпарных аппаратах перенос энергии от теплоносителя (как правило, это водяной пар) к продукту осуществляется посредством теплопередачи. Чем более вязкий и более концентрированный раствор, тем менее

эффективной является схема теплопередачи. На греющих поверхностях аппарата формируется (рис. 1) вязкий пограничный слой из наиболее концентрированного продукта. Удовлетворительных решений по механическому воздействию и удалению этого слоя нет. Именно в этом слое происходит локальный перегрев продукта, что дает привкус варки либо пригар. Чтобы это избежать, ограничивают значение конечной концентрации раствора.

Электромагнитная энергия находит в объеме продукта полярные молекулы жидкости (воду), переводит воду в пар. Здесь нет классической теплопередачи, и это является предпосылкой получения более концентрированного и качественного продукта при минимальных термических воздействиях на сырье.

Поскольку все эти схемы используют различные виды энергии, анализ сводится к эффективности использования энергии первичного топлива органического происхождения. Расход топлива принят равным 100 %.

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

Подробно конверсия энергии топлива в элементах установок поясняется схемами (рис. 3, 4). Традиционно, для получения концентрированных растворов, после выпарки проводят сушку.

В схеме (рис. 3) анализируется вариант, когда количества удаленной влаги и при выпарке, и при сушке равны. В этом случае инновационная технология требует затрат топлива на 6% меньше. По мере повышения доли сушки, эффективность микроволновой вакуумной выпарной установки (МВУ) будет расти. Часто главным приоритетом является максимальное сохранение в готовом продукте пищевого потенциала сырья. В этом случае, традиционная сушка не может конкурировать с предложенной схемой МВУ.

Следующим этапом является аналитические исследования кинетики концентрирования.

Параметрами качества считаем конечную концентрацию сока ( $X_k$ ) и удельные затраты

энергии на концентрирование 1кг продукта (j, Дж/кг). Входными параметрами, в общем случае, являются теплофизические свойства сока, его расход, начальные значения концентрации и температуры.

#### 4. Моделирование процессов выпаривания в МВУ

На первом этапе проведем исследование параметрической модели процесса (рис. 5).

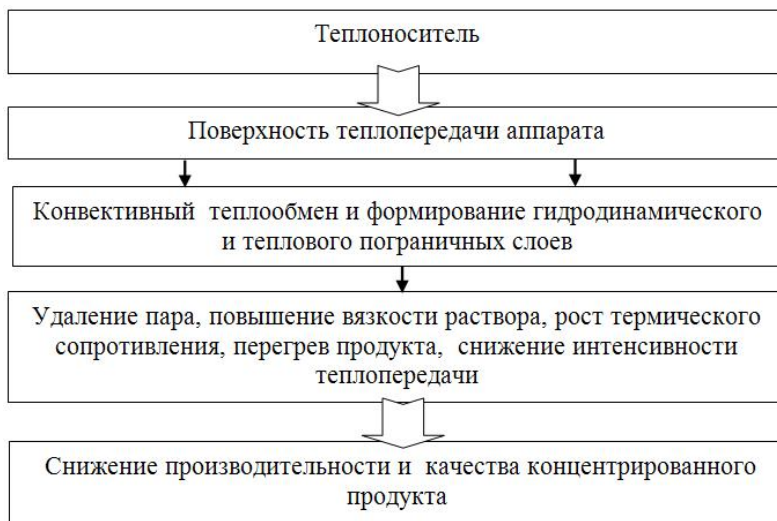


Рис. 1. Теплофизическая модель традиционного выпарного аппарата.

В инновационном микроволновом вакуум - выпарном аппарате процесс протекает иначе (рис. 2).

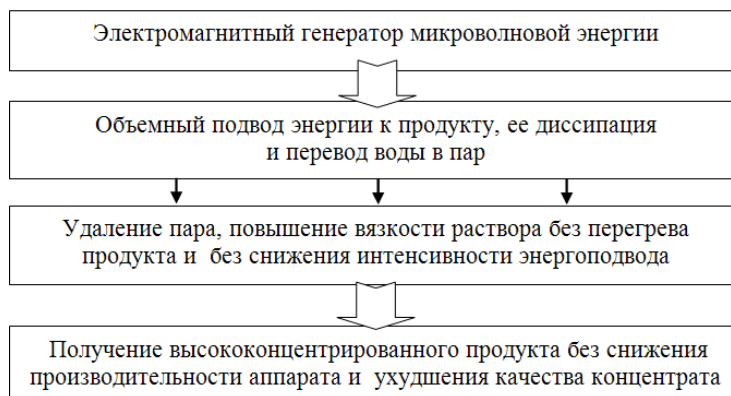


Рис. 2. Теплофизическая модель инновационного микроволнового выпарного аппарата.

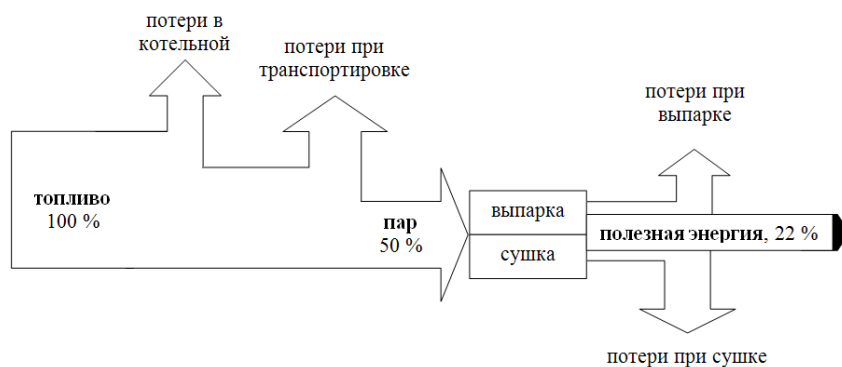


Рис. 3. Конверсия энергии в традиционной технологии получения пищевых концентратов.

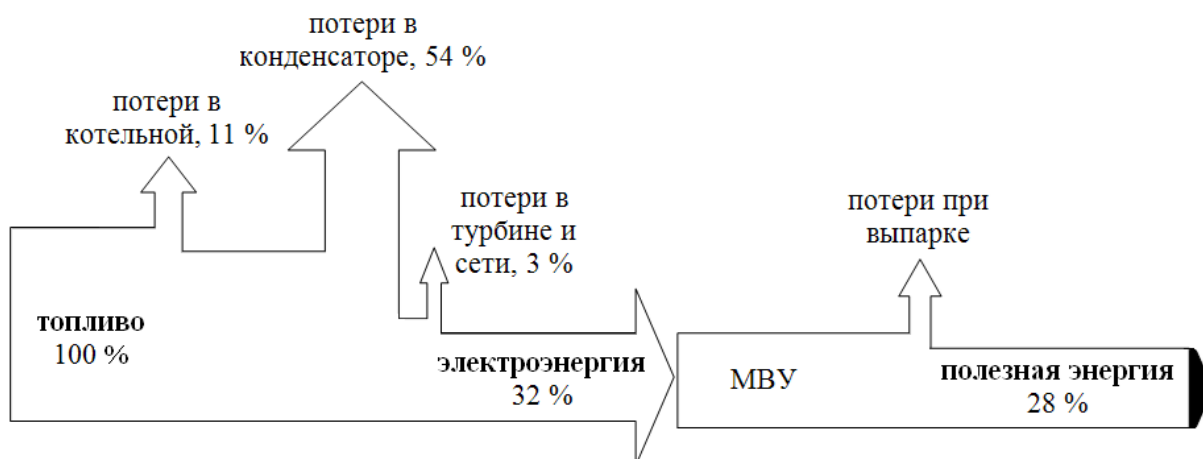


Рис. 4. Конверсия энергии в инновационной технологии получения пищевых концентратов.

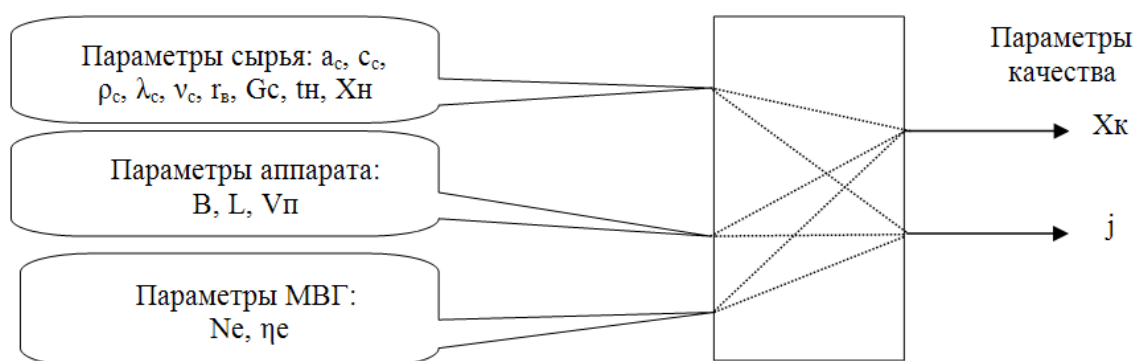


Рис. 5. Параметрическая модель микроволнового выпарного аппарата.

Учитываются комплексы параметров, которые характеризуют конструкцию аппарата и энергетические показатели генераторов электромагнитной энергии (МВГ).

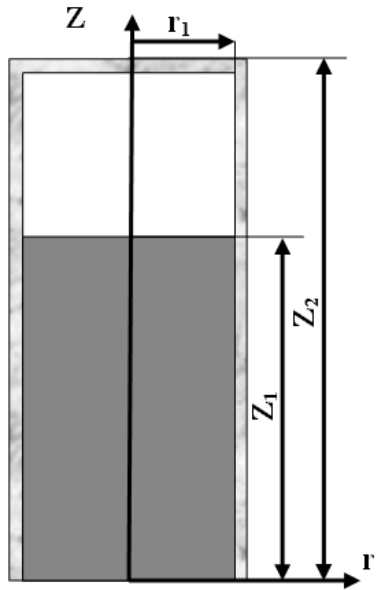
На основе схемы (рис. 5) составлена физическая модель аппарата (рис. 6), которая является постановкой задачи формирования математической модели. Рассмотрим математическую модель микроволнового вакуум выпарного аппарата. Аппарат состоит из 3 зон (рис.6). В первой зоне расположен продукт, именно здесь осуществляется энергетическое воздействие на исследуемую систему. Подвод энергии (N) в аппарате объемный, при ГУ II рода. Вторая зона заполнена водяными парами, подвод энергии здесь отсутствует. Третья зона – это радиопрозрачный корпус аппарата (реакционного объема).

В основе моделирования первый закон термодинамики и уравнение Фурье-Кирхгофа, которые отражают тепловые взаимодействия между элементами рассматриваемой системы.

Поскольку работа, в соответствии с поставленной задачей равна нулю, то первый закон термодинамики для этого случая запишется в виде:

$$Q_{cm} + Q_V = \Delta U \quad (1)$$

где  $Q_{cm}$  – количество теплоты, полученное (или отданное) телом через поверхность контакта (S);  $Q_V$  – количество теплоты, которое поглощается продуктом от электромагнитных источников энергии;  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии.



Зона 2 – пар, объем  $V_2$ ;  
 $0 \leq r \leq r_1$ ;  $Z_1 \leq Z \leq Z_2$ ; температуры –  $t_2$   
Мощность  $N = 0$

Зона 1 – продукт, объем  $V_1$ ;  
 $0 \leq r \leq r_1$ ;  $0 \leq Z \leq Z_1$ ; температуры –  $t_1$   
Мощность –  $N$   
Этап 1 – нагрев (от  $t_1$  до  $t_n$ );  $W = 0$ .  
Этап 2 – выпарка ( $t_n = \text{const}$ )

Рис. 6. Постановка задачи моделирования

Количество теплоты  $Q_{cm}$ ,  $Q_V$  и изменение внутренней энергии тела может быть вычислено по формулам

$$Q_{cm} = \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} dQ d\tau, \quad Q_V = \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} q_V dV d\tau, \quad \Delta U = \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dV d\tau \quad (2)$$

где  $q_v$  – удельная мощность внутренних источников (стоков) теплоты, Вт/м<sup>3</sup>.

С учетом уравнения Фурье соотношения (2), в цилиндрической системе координат примет вид:

$$\int_0^{\tau} \int_0^{\tau} dQ d\tau = \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] dV d\tau \quad (3)$$

Подставив далее (3) в (1), имеем

$$\int_0^{\tau} \int_0^{\tau} \left[ c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) - \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) - q_V \right] dV d\tau = 0 \quad (4)$$

Если все характеристики в (4) – непрерывные функции координат и времени,

то интеграл равен нулю при равенстве нулю подынтегрального выражения. Следовательно

$$c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_V \quad (5)$$

Уравнение (5) устанавливает связь между временным и пространственным изменением температуры в любой точке тела. При постоянной теплопроводности уравнение (5)

упрощается и приводится к линейному дифференциальному уравнению в частных производных второго параболического типа. Общие закономерности (5) позволяют

конкретизировать модели для всех 3 зон аппарата. Для 1 зоны (рис. 6) известно: объем продукта  $V_1$ ; энергия, потребляемая продуктом  $N\eta\tau$ ; температуры –  $t_1$ . Процесс протекает в диапазонах давлений  $P_a \leq P \leq P_n$ .

Анализ выполним отдельно для 1 этапа (нагрева продукта от начальной температуры

$t_1 = t_n$  до температуры испарения  $t_1 = t_n$ ) и для 2 этапа (собственно выпарки).

На первом этапе выход пара отсутствует ( $W = 0$ ), и энергия расходуется только на повышение температуры продукта.

Для высот  $0 \leq Z \leq Z_1$ ; радиусов  $0 \leq r \leq r_1$ :

Начальные условия ( $\tau = 0$ ):  $t_1 = t_n$ ;  $V_1 = V_n$ .

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left( \frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_1 c_{1V} \rho_1}, \quad (6)$$

где  $a = \lambda / (c_v \rho)$  – изохорическая температуропроводность,  $m^2/s$ .

Для второго этапа, непосредственно выпарки, процесс характеризуется постоянством температуры фазового перехода ( $t_n = \text{const}$ ), а подведенная энергия ( $N\eta\tau$ ) расходуется на повышение внутренней энергии при изменении теплоемкости, переводу воды в пар. В результате – повышение концентрации сока. Уравнение энергии примет вид:

$$N\eta\tau = V_u t_u * (c_1 \rho_1 - c_2 \rho_2) \quad (7)$$

При выпаривании объем сока в камере уменьшается

$$V_1(\tau) = V_n - V_u(\tau) \quad (8)$$

Для зоны 2, которая заполнена водяным паром, температуры пара –  $t_2$ , объем пара  $V_2$ , энергия паром не поглощается ( $N = 0$ ). Таким образом, при  $0 \leq r \leq r_1$ ;  $Z_1 \leq Z \leq Z_2$  математическая модель аналогична (6) при замене  $t_1$  на  $t_2$  и  $a_1$  на  $a_2$ .

На границе 1 и 2 зон (для основного периода - выпарки) ГУ 1 рода:  $t = t_n = \text{const}$ .

Для зоны 3, которая представляет стенку реакционного объема, температуры материала –  $t_3$ , объем  $V_3$ , энергия стенкой не поглощается ( $N = 0$ ). Таким образом, при  $r_1 \leq r \leq r_3$ ;  $0 \leq Z \leq Z_3$  модель аналогична (6) при замене  $t_1$  на  $t_3$  и  $a_1$  на  $a_3$ .

На границе 1 и 3 зон (для основного периода – выпарки) ГУ 3 рода

$$\frac{\partial t_3}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_1}{\lambda_3} (t_1 - t_3) \quad (9)$$

На границе 2 и 3 зон (для основного периода – выпарки) ГУ 3 рода

$$\frac{\partial t_3}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_2}{\lambda_3} (t_2 - t_3) \quad (10)$$

В соотношениях (2) – (10):  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $N$  – мощность электромагнитного генератора;  $\eta$  – КПД магнетрона;  $\tau$  – время работы; индексы 1 – жидкая фаза; 2 – пар; 3 – стенка реакционного объема.

Таким образом, система соотношений (2) – (10) определяет нестационарное поле температур, материальный и энергетический балансы процессов выпарки. Однако практическая реализация модели оказывается сложной. Для получения инженерной методики привлечем методы теории подобия.

### 5. Применение метода обобщенных переменных при исследовании МВУ.

Из параметрической модели (рис.5) следует, что производительность аппарата по выпаренной влаге определяется мощностью электромагнитных генераторов ( $N$ ); объемом, который занимает сырье ( $V_c$ ), и объемом в нем влаги ( $V_v$ ); теплофизическими свойствами растворителя, основными из которых является энергия, необходимая для фазового перехода, т.е. удельная теплота испарения ( $r$ ). Именно ( $r$ ), по всей видимости, является комплексной характеристикой свойств растворителя. Относительно сока – это удельная теплота испарения воды при давлении в аппарате.

Соотношение энергии, необходимой для испарения в базовой технологии ( $Q_{и}$ ), и энергии, затрачиваемой на процесс

выпаривания (N), можно учесть числом энергетического действия [12], числом Бурдо (Bu). Тогда:

$$Bu = \frac{N}{W_0 b r} c \quad (11)$$

Поскольку удельная теплота испарения (r) является функцией давления, то число (Bu) должно учитывать влияние давления, при котором проходит процесс выпарки. Коэффициент (b) учитывает соотношение расходов котельного и вторичного пара.

Интенсивность выпаривания должна зависеть от соотношения объемов сырья и влаги в нем. Предлагается ввести для этого параметрический комплекс – безразмерное объемное влагосодержание (V):

$$V = V_b / V_c \quad (12)$$

Поскольку влияние (V) начнется с некоторого критического значения ( $V_k$ ), то процедура расчета должна предусматривать оценку текущих значений (V), сопоставление с критическим значением ( $V_k$ ) и определить время ( $\tau$ ), когда поправку на (V) следует учитывать.

Текущую производительность аппарата предлагается рассчитывать по критериальной модели:

$$W = \frac{W_u}{W_0} = A * Bu^n * V^m \quad (13)$$

Безразмерная производительность аппарата (W) имеет смысл отношения текущей производительности ( $W_u$ ) к базовой (принимается,  $W_0 = 1 \text{ г/с}$ ). Рассчитывается для отдельных отрезков времени ( $\tau$ ).

В модели (13) предполагается, что отсутствие гидродинамического пограничного слоя нивелирует влияние вязкости продукта на процесс выпаривания. Если в результате экспериментальных исследований такое влияние будет установлено, то соотношение (13) следует дополнить классическим числом Прандтля.

## 6. Экспериментальное моделирование кинетики выпарки гранатового сока в МВУ.

Основными узлами экспериментального стенда (рис. 7) являются: выпарная камера, конденсатор (КД), водоохладитель (ВДО), сборник конденсата (СК), вакуум-насос (ВН) и измерительно-вычислительный комплекс (ИВК).

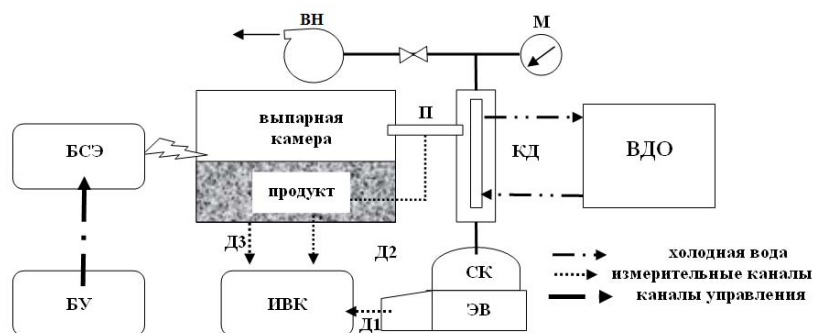


Рис. 7. Схема экспериментального стенда

Паровые объемы выпарной камеры и конденсатора соединены паропроводом (П), контроль вакуума в системе проводится образцовым вакуумметром (М). Подвод электромагнитной энергии осуществляется блоком силовой электроники (БСЭ) по командам блока управления (БУ), который содержит таймер и регулятор мощности. Водоохладитель состоит из парокомпрессорной холодильной машины, емкости с охлаждаемой водой, регулятора температуры воды и циркуляционного

насоса, который обеспечивает подачу холодной воды в конденсатор (КД). Стенд компьютеризирован, текущая информация от электронных весов (датчик Д1), измерителя температуры выходящего пара (датчик Д2) и продукта в выпарной камере (датчик Д3) через интерфейс поступает, регистрируется и обрабатывается процессором ИВК. В стенде использовались электронные весы (ЭВ) типа ТВЕ-0,21-0,01 и датчики температур типа Dallas DS 18b20. Информация собиралась на ноутбук либо планшет CHUWI CW1506.



Разработанная программа предусматривала отображение на экране дисплея термограмм, убыли влаги из камеры и мгновенные значения скорости удаления влаги (% в минуту).

В качестве объекта экспериментального моделирования выбран гранатовый сок и сок

эхинацеи. Это перспективные соки с высокой антиоксидантной активностью. В опытах изменялась мощность магнетрона, объем сока, его концентрация. Весы (рис. 7) регистрировали вес конденсата в сборнике (СК). Таким образом, с высокой точностью определялся выход пара. Результаты обработки опытов приведены на рисунке 8.

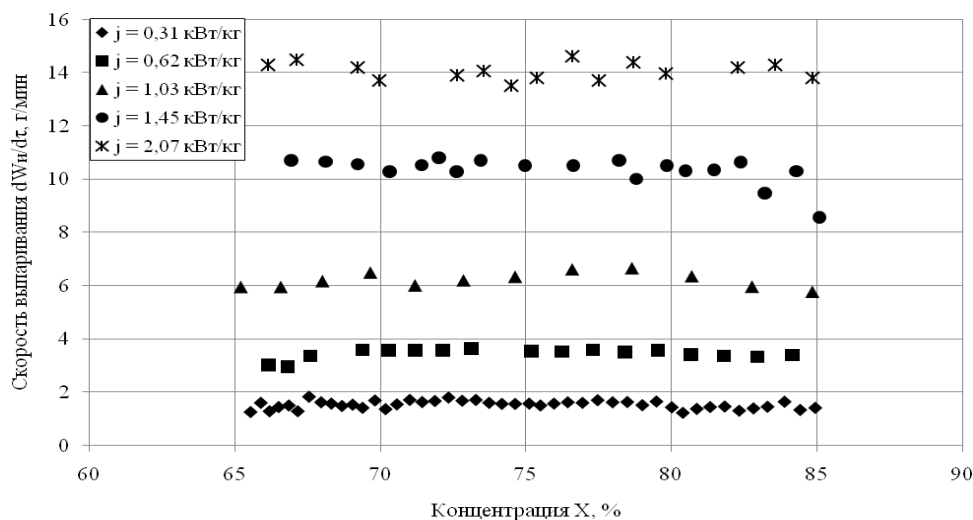


Рис. 8. Зависимость производительности выпарного аппарата от концентрации

На основе полученных зависимостей (рис.8) можно сделать три вывода. Во-первых, аппарат позволяет достичь высоких концентраций сока. Если в традиционных технологиях получают до 65% сухих веществ в концентратах гранатового сока, то при микроволновом подводе энергии получено 85% (рис.8). Во-вторых, производительность аппарата пропорциональна подводимой мощности. В-третьих, вплоть до значений 85% величина концентрации раствора не оказывает практического влияния на производительность выпарного аппарата.

Температуры вторичного пара на выходе из выпарной камеры составляет 30-35 °С.

Аналогичные зависимости были получены в трех сериях с разными значениями объема сока в широком диапазоне изменения мощности подводимой энергии.

Общее количество обработанных данных для гранатового сока составило 300 точек. В обработку дополнительно включены экспериментальные данные, проведенные на аналогичном стенде с соком эхинацеи. Обработка полученных экспериментальных данных, проведенная по модели 13. В

результате получено критериальное уравнение:

$$W = \frac{W_e}{W_o} = 0.76 * Bu^{1.13} \quad (14)$$

Соотношение (14) позволяет с погрешностью не более 20% рассчитать производительность микроволнового вакуум-выпарного аппарата в диапазоне чисел энергетического действия  $0,4 \geq Bu \geq 0,04$ .

Таким образом, предложена методика проектирования инновационного выпарного аппарата с селективным подводом энергии. В открытом доступе информации о подобных аппаратах ограничены только технологическими вопросами [4].

#### Выводы.

Доказана гипотеза о возможности направленного подвода энергии непосредственно к воде в пищевых жидкостях, что исключает формирование пограничного слоя и перегревы в объеме сгущаемого раствора. Процесс концентрирования проходит без

традиционной теплопередачи. Принципы селективного подвода энергии к отдельным компонентам раствора позволяют, по сравнению с традиционными технологиями выпаривания, в 1,5 – 2 раза увеличить выходную концентрацию продукта, организовать процесс выпаривания при температурах 30 – 35 °С и стабильных параметрах паропроизводительности.

Показана возможность производства принципиально новых инновационных пищевых продуктов с концентрацией сухих веществ до 85%. Такие продукты в полной мере отвечают современным требованиям экоиндустрии и концепции функционального питания.

#### Литература (References)

- [1] Manal A. Sorour. Optimization of multiple effect evaporators designed for fruit juice concentrate // American Journal of Energy Engineering, 2015, pp. 6-11.
- [2] F. Khajehei, M. Niakousari, M. H. Eskandari, M. Sarshar. Production of Pomegranate juice concentrate by complete block cryoconcentration process // Journal of Food Process Engineering, 2015, Vol. 38, Issue 5, pp. 488-498.
- [3] S. Chantasiriwan. Simulation of quadruple-effect evaporator with vapor bleeding used for juice heating // International Journal of Food Engineering 2016, Vol. 2, No. 1, pp. 36-41.
- [4] M. Fazaeli, G. Hojjatpanah, Z. Emam-Djomeh. Effects of heating method and conditions on the evaporation rate and quality attributes of black mulberry (*Morus nigra*) juice concentrate // Journal of Food Science and Technology, 2013, Vol. 50, Issue 1, pp. 35-43.
- [5] A. Aloqbi, U. Omar, M. Youss, M. Grace, M. A. Lila, N. Howell. Antioxidant activity of pomegranate juice and punicalagin // Scientific Research Publishing. Natural Science, 2016, 8, pp. 235-246
- [6] Kaprel'yants L.V. Funktsional'ni producty /L.V. Kaprel'yants, K.G.Iorgachova.- O.: "Druk", 2003.- 233s.
- [7] Arai S. Global view on functional foods. Asian perspectives //British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 - 139-143.
- [8] Lucas J. EU-funded research in functional foods //British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 - 131-132.
- [9] Milner J.A. Functional foods and health: a US perspective // British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 - 131-132.
- [10] Roberfroid M.B. Global view on functional foods: European perspectives //British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 - 133-138.
- [11] Weststrate J.A., G. van Poppel, P.M. Verschuren /Functional foods, trend and future British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 - 233-235.
- [12] Burdo O.G., Pischevyye nanoenergotehnologii [Food nanotechnologies] - Herson, 2013 - 294p.

#### Сведения об авторах.



**Бурдо Олег Григорьевич** – заслуженный деятель науки и техники Украины, д.т.н., профессор, зав. кафедрой процессов, оборудования и энергетического менеджмента ОНАПТ. Область научных интересов: теплофизика, массообмен, энергоэффективное оборудование.  
E-mail: [terma\\_onaft@rambler.ru](mailto:terma_onaft@rambler.ru)



**Бурдо Алла Константиновна** – к.т.н., доцент кафедры технологии ресторанного и оздоровительного питания Одесской национальной академии пищевых технологий. Сфера научных интересов: технологии производства концентрированных экстрактов из растительного сырья.  
E-mail: [alenuhka-9@mail.ru](mailto:alenuhka-9@mail.ru)



**Сиротюк Илья Вадимович** – магистрант Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: системы адресной доставки энергии и аппараты на их основе.  
E-mail: [ilyxin\\_09@mail.ru](mailto:ilyxin_09@mail.ru)



**Давар Ростами Пур** – директор фирмы «Davarrostamipour». Сфера научных интересов: технологии производства концентрированных фруктовых соков.  
E-mail: [drpgroup@gmail.com](mailto:drpgroup@gmail.com)