

Электродинамические аппараты для концентрирования растворов

О. Г. Бурдо^{а,*}, А. В. Гаврилов^б, И. В. Сиротюк^а, Н. В. Ружицкая^а, Д. С. Гончаров^с

^аОдесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, 65039, Украина

^бАкадемия биоресурсов и природопользования «КФУ им. В.И. Вернадского», г. Симферополь, 295007, Крым

^сПАО «Черноморский масложировой комбинат», г. Черноморск, 68000, Украина,

*e-mail: poem.onaft@gmail.com

Поступила в редакцию 07.11.2020

После доработки 20.01.2021

Принята к публикации 21.01.2021

Цель работы – создание конструкции энергоэффективного аппарата для концентрирования растворов и инженерных методов его расчета. Представлены результаты комплексных исследований электродинамических вакуум-выпарных аппаратов. Обоснована научно-техническая концепция технологии направленного энергетического действия применительно к аппаратам электродинамического типа. Дан системный анализ энергетики традиционного оборудования для обезвоживания. Методом электротепловой аналогии определены их технологические и энергетические проблемы. Показано, как эти проблемы решаются в аппаратах электродинамического типа. Разработаны физическая схема и математическая модель электродинамического вакуум-выпарного аппарата непрерывного действия. Сформулированы допущения, учитывающие специфику выпаривания в условиях электромагнитного поля. Представлена система дифференциальных уравнений, устанавливающая взаимодействие раствора с электромагнитным полем в условиях вакуума. Нестационарная модель методами теории подобия и «анализа размерности» преобразована в соотношения в безразмерных переменных. Определены задачи экспериментального моделирования. Приведены результаты комплексных экспериментальных исследований микроволнового вакуум-выпарного аппарата. Установлено влияние мощности электромагнитного поля, вида и концентрации раствора и уровня давлений на паропроизводительность. Определены константы в уравнении в обобщенных переменных, которое с погрешностью в пределах 8% устанавливает связь числа энергетического действия с безразмерными комплексами, характеризующими технологические параметры. Основным результатом работы являются конструкция модуля вакуумного микроволнового непрерывно действующего выпарного аппарата и данные его стендовых испытаний. Показано, что разработанный аппарат обеспечивает концентрацию продукта до 90 °brix при температурах до 40 °C и затратах энергии до 2,7 МДж на 1 кг испаренной влаги.

Ключевые слова: электродинамические аппараты, пищевые энерготехнологии, выпарка, аналитическое моделирование, экспериментальные и хроматографические исследования

УДК 664.063.94-046.62:62-523.2

<https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.4.66>

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии производства продуктов питания характеризуются энергоемкостью и оказывают серьезную нагрузку на окружающую среду [1]. Термическое оборудование пищевой индустрии отличается большим разнообразием и крайне низкой эффективностью использования энергетических ресурсов [1–3]. Отсутствуют удовлетворительные технические решения по экологической безопасности пищевых производств [4]. Технологии, которые производят концентрированные пищевые продукты, требуют повышенных расходов энергии для обезвоживания сырья [5]. Процессы выпаривания и сушки являются, как правило, заключительной стадией производства и в значительной степени

влияют на себестоимость готового продукта и на его качество. Поэтому актуальными становятся задачи комплексного решения проблем обезвоживания.

СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЕМКИХ ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФОРМУЛИРОВКА НАУЧНЫХ ГИПОТЕЗ

В технике обезвоживания наибольшее распространение получили выпарные аппараты и сушильные установки [6–8]. Выпарные аппараты имеют энергетический КПД в 2 раза выше, чем сушилки, но при выпаривании термолабильных пищевых растворов ограничиваются конечными концентрациями продукта [9–12]. Поэтому часто применяют ступенчатые принципы: на первом этапе выпарка, а окончательное обезвоживание – в сушилке.

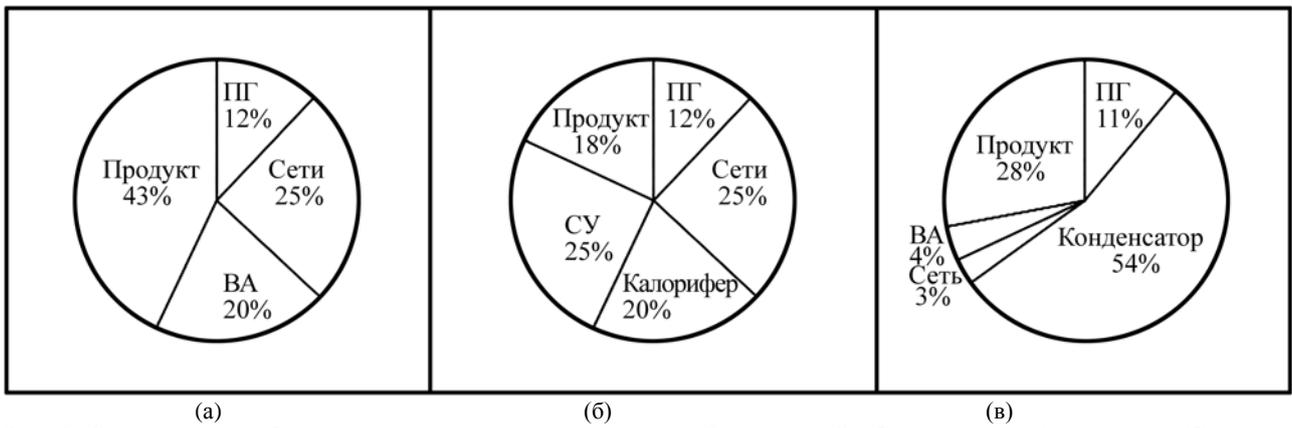


Рис. 1. Энергетические балансы традиционных и инновационной технологий обезвоживания: (а) выпарка; (б) сушка; (в) электродинамические выпарные аппараты (ПГ – парогенератор; ВА – выпарной аппарат; СУ – сушильная установка).

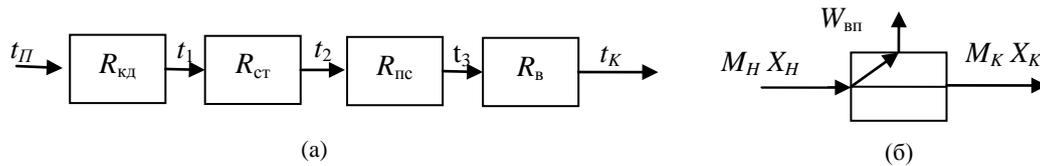


Рис. 2. Схема традиционной технологии выпаривания: (а) схема теплопередачи; (б) схема материальных потоков.

Известны проблемы и при сравнении различных технологий обезвоживания, особенно если источники энергии у них разные. Так, наиболее экологически безопасной и энергосберегающей является сушка под действием солнечного излучения, но наряду с высокой продолжительностью она зависима от погодных условий. Наиболее распространена конвективная сушка горячим воздухом, однако при использовании данных технологий продукт подвергается действию высоких температур на протяжении длительного времени, что негативно влияет на его качество [13]. Использование для сушки инфракрасного излучения позволяет снизить потери тепла в аппаратах за счет передачи энергии непосредственно к продукту, но при этом большая часть передаваемой энергии поглощается только поверхностью продукта [14]. Все больше внимания обращают на себя технологии диэлектрического нагрева продукта под воздействием радиочастотного и микроволнового электромагнитного излучений. Радиоволны проникают в продукт на большую глубину, чем микроволны, но возникают сложности с обеспечением равномерности нагрева. Кроме того, применение радиочастотного нагрева ограничивается во избежание создания помех для средств связи [13]. Микроволновые технологии успешно применяются для обезвоживания как жидких, сыпучих продуктов, так и целых фруктов и овощей [15–17]. Микроволновый энергоподвод при обезвоживании комбинируют с осмотической сушкой [18], вакуумом [19], конвективной сушкой горячим воздухом [20]. Объективные

результаты дают системные исследования всей цепи конверсии энергии «топливо – его трансформации в соответствующий вид энергии – распределительная сеть – концентрат» [21]. Рассмотрим энергетические балансы технологий обезвоживания. За 100% принята энергия топлива (рис. 1).

Традиционная теплопередача осуществляется от греющего пара с температурой t_{II} к продукту (концентрату с температурой t_K). При этом последовательно осуществляются (рис. 2а): конденсация греющего пара (термическое сопротивление процесса R_{kd}), теплопроводность через стенку аппарата (R_{st}), теплопроводность через пристенный пограничный слой (R_{nc}) и непосредственно выпаривание (R_v). При этом в процессе выпаривания растут: концентрация раствора (X), его вязкость (μ). В результате растет толщина пограничного слоя (δ), что оказывает определяющее влияние на технологический процесс (таблица).

Рост температуры поверхности пограничного слоя (t_3) имеет негативные последствия. У концентрата появляется привкус «варки» и снижается паропроизводительность аппарата (W). В связи с этим на практике ограничиваются значением конечной концентрации до 26–60%. Простых и надежных решений этой проблемы на традиционных принципах нет.

Инновационные проекты новых технологий обезвоживания базируются на использовании разработанной авторами технологии адресной доставки энергии непосредственно к влаге сырья [21]. Такой принцип должен устранить отрицательное влияние всех параметров

Таблица. Динамика изменения основных параметров при выпарке

τ	$t_{\text{П}}, R_{\text{кд}}, R_{\text{ст}}$	X	μ	δ	$R_{\text{ис}}$	t_3	$R_{\text{в}}$	W	Качество
↑	const	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓

(таблица), влияющих на формирование теплового пограничного слоя, и гарантировать стабильную паропроизводительность в широком диапазоне концентраций раствора. Происходят генерация и отвод пузырьков пара из всего объема жидкости. В результате исключаются условия термической порчи продукта, поскольку пограничный слой отсутствует. Готовый продукт достигает высокой концентрации, сохраняет нативные свойства сырья. Ограничением применимости таких аппаратов являются растворы с полярными молекулами. Практически для всех видов пищевого сырья указанные условия выполняются.

Рассмотрим энергетику выпарных аппаратов с электромагнитными генераторами (рис. 1в). В расчетах принято: энергетический КПД преобразования топлива в электроэнергию – 32%, а КПД преобразования электрической энергии в МВ-камерах – 75%. Резервы повышения эффективности использования энергии в традиционных технологиях обезвоживания полностью исчерпаны, тогда как электродинамические системы при переходе на газотурбинные схемы генерации электроэнергии (с КПД 60%) могут практически вдвое стать эффективней. Это тоже свидетельствует о перспективности электродинамических аппаратов в пищевых технологиях.

Анализ литературных источников показывает, что в последнее время аппаратами электродинамического типа активно занимаются. В условиях лаборатории доказана их эффективность при обработке пищевого сырья. Так, МВ технологии используются для извлечения из виноградных выжимок фенольных соединений [22]; при обработке незрелого винограда сорта Мерло [23]; для экстрагирования масла агарового дерева [24]; при сушке хурмы [25]. Перспективность электродинамических технологий подтверждается и в работах авторов [26].

Поэтому в работе поставлена цель: создать аппарат для обезвоживания пищевых растворов, способный повышать концентрацию продукта до уровня сушилок, но при уровне затрат энергии в выпарных аппаратах.

Для достижения цели привлекается предложенная авторами научно-техническая концепция [26]: «в условиях электромагнитного поля можно организовать адресную доставку энергии к полярным молекулам элементов сырья». На базе этой концепции формулируется

гипотеза: «перевод технологий подвода энергии от граничных условий (ГУ) 3 рода к ГУ 2 рода в выпарных аппаратах позволит реализовать инновационный способ адресной доставки энергии непосредственно к влаге сырья». Ожидается создание установок, где нивелируется влияние вязкости продукта, исчезает понятие термического пограничного слоя, организуется генерация паровой фазы во всем объеме раствора и появляется возможность стабилизации величины паропроизводительности в широком диапазоне концентраций продукта. Ожидается получение продукта высокой концентрации без термической порчи его в пограничном слое, без привкуса «варки», без изменения цвета и аромата.

Ограничением в работе электродинамических аппаратов является присутствие в растворе полярных молекул, что для пищевых растворов всегда выполняется. Вместе с тем кинетика таких процессов определяется параметрами электромагнитного поля и их согласованием со спецификой раствора.

Дальнейшие исследования направлены на решения этих задач.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В основе математического моделирования лежит физическая схема инновационного выпарного аппарата (рис. 3).

Основная техническая идея аппарата – в организации процесса выпаривания из раствора 3 (рис. 3). Использование технологии адресной доставки энергии [26] к полярным молекулам растворителя при граничных условиях (ГУ) 2 рода позволяет процесс парообразования проводить без традиционной теплопередачи (рис. 2).

Исходный раствор подается непрерывно в рабочую камеру 1 через патрубок 4. За счет потока электромагнитной энергии мощностью N в объеме продукта 3 генерируются пузырьки пара растворителя. Для отделения капель раствора предусмотрен сепаратор 2. Пар отводится из камеры 1 в конденсатор – дистиллятор через патрубок 6, а концентрат – в емкость готового продукта через патрубок 5.

Исследование статистики процесса выпаривания определило массовые балансовые и энергетические модели схемы (рис. 2), где принято:

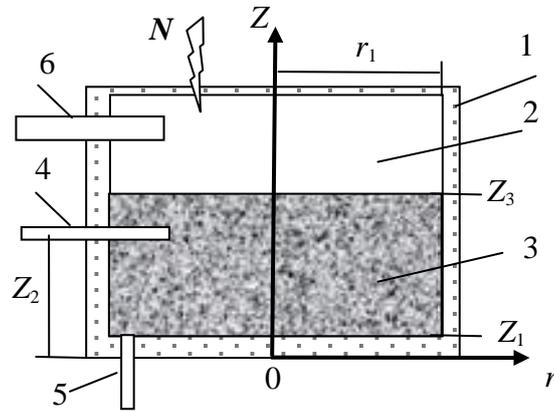


Рис. 3. Постановка задачи моделирования: 1 – герметичный корпус, выполненный из радиопрозрачного материала; 2 – объем для сепарирования пара; 3 – раствор; 4 – патрубок для подачи раствора; 5 – патрубок для выгрузки концентрата; 6 – патрубок для выхода пара; r – радиус; Z – координата.

M_H – начальный массовый поток сырья с концентрацией сухих веществ X_H ; M_K – массовый поток продукта с концентрацией X_K ; $W_{ВП}$ – вторичный пар после выпарки. Балансовые модели массовых потоков для процесса выпарки имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} M_H &= M_K + W_{ВП} \\ M_K \times X_K &= M_H \times X_H \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Решение системы (1) определяет содержание сухих веществ в концентрате на выходе из выпарного аппарата:

$$X_K = \frac{M_H \times X_H}{M_H - W_{ВП}}. \quad (2)$$

При выпаривании изменение объема жидкости в камере (ΔV_p) определяется потоками M_H , M_K и $W_{ВП}$:

$$\Delta V_p(\tau) = M_H \times \rho_H - M_K \times \rho_K - W_{ВП} \times \rho_{ВП}. \quad (3)$$

При выпарке процесс протекает при постоянной температуре фазового перехода ($t_u = \text{const}$). Подведенная электромагнитная энергия ($N\eta$) расходуется на повышение внутренней энергии при изменении теплоемкости, перевод воды в пар и на компенсацию потерь теплоты в окружающую среду (Q_C). Уравнение энергии примет вид:

$$N \times \eta = W_{ВП} \times r + Q_C, \quad (4)$$

где η – КПД электромагнитного источника энергии; r – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг.

При формировании нестационарной математической модели процесса выпаривания при граничных условиях 2 рода примем следующие допущения.

1. Поток электромагнитной энергии, поступающей в камеру, расходуется на повышение внутренней энергии продукта и рассматривается как равномерно распределенные по объему внутренние источники энергии.

2. Все физические характеристики в процессе выпаривания являются непрерывными функциями координат и времени.

3. Моделирование ограничивается цилиндрической конструкцией аппарата и проводится в цилиндрических координатах.

4. Основные процессы развиваются относительно осевой координаты, вкладом радиальной, и окружной координат пренебрегается.

5. Действие гравитационных и инерционных сил в объеме раствора пренебрегается.

6. Теплообмен на границах «раствор – пар» и «наружная поверхность корпуса аппарата – окружающая среда» отсутствует.

Моделирование нестационарной задачи процесса выпаривания проводилось на детерминированной основе. Привлекаются первый закон термодинамики и уравнение Фурье-Кирхгофа, которые отражают тепловые взаимодействия между продуктом и электромагнитным полем. Количество теплоты, которое поглощается продуктом в объеме (V) за время (τ), определяется по соотношению:

$$Q_V = \int_0^\tau \int_V q_V \times dV d\tau, \quad (5)$$

где q_V – удельная мощность внутренних источников (стоков) теплоты, Вт/м³.

Энергия электромагнитных генераторов расходуется на изменение внутренней энергии продукта:

$$\Delta U = \int_0^\tau \int_V c_V \times \rho \times \frac{\partial t}{\partial \tau} \times dV d\tau. \quad (6)$$

С учетом уравнения Фурье первый закон термодинамики в одномерной записи в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\int_0^\tau \int_V \left[c_V \times \rho \times \frac{\partial t}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \times \frac{\partial t}{\partial z} \right) - q_V \right] \times dV d\tau = 0. \quad (7)$$

При условии, что все характеристики в (7) – непрерывные функции координат и времени, получим:

$$c_v \times \rho \times \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \times \left(\lambda \times \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v. \quad (8)$$

Дифференциальное уравнение (8) устанавливает нестационарные поля температур по высоте в объеме раствора. Принято считать, что коэффициент теплопроводности не изменяется в пределах диапазона исследований. Это существенно упрощает уравнение (8) и приводит его к линейному дифференциальному уравнению в частных производных второго параболического типа.

Закономерности (5–8) являются общими для всех 3 зон аппарата – раствора, пара и окружающей среды. На их основе можно конкретизировать математические модели для всех 3 зон. Дальнейший анализ проведем для 3 зоны (рис. 3), где происходит взаимодействие раствора с электромагнитным полем. Примем: объем раствора V_3 температура – t_3 . За время (τ) продукт потребляет энергию $N\eta\tau$. Процесс в диапазонах давлений $P_a \leq P \leq P_u$ протекает в два этапа. На 1 этапе продукт нагревается от начальной температуры $t_3 = t_n$ до температуры испарения $t_3 = t_u$. При этом $W = 0$.

Для (рис. 3) высот $0 \leq Z \leq Z_3$; радиусов $0 \leq r \leq r_1$.

Начальные условия ($\tau = 0$): $t_3 = t_n$; $V_3 = V_n$:

$$\frac{\partial t_3}{\partial \tau} = a_3 \times \left(\frac{\partial^2 t_3}{\partial z^2} \right) + \frac{N \times \eta}{V_3 \times c_3 \times \rho_3}, \quad (9)$$

где $\alpha = \lambda / (c_v \rho)$ – коэффициент температуропроводности раствора, $\text{м}^2/\text{с}$.

На втором этапе основные затраты энергии связаны с генерацией паровой фазы при неизменной температуре процесса. Тогда на основе (9) можно записать:

$$N \times \eta = W_{\text{ВП}} \times t_H \times (c_2 - c_3) = W_{\text{ВП}} \times r. \quad (10)$$

Гидравлическая ситуация в объеме раствора устанавливается уравнением Навье-Стокса. В соответствии с вышепринятыми допущениями запишем:

$$\rho_B \times \omega_B \times \frac{\partial \omega_B}{\partial z} = \frac{\partial P_B}{\partial z}. \quad (11)$$

Систему уравнений (5–11) не сложно дополнить начальными условиями для зоны пара, корпуса и окружающей среды. Запишем уравнения связи и граничные условия на поверхностях контакта: «раствор – пар», «пар – корпус» и «корпус – окружающая среда» – 3 рода; «элементы конструкции аппарата» – 4 рода; «объем раствора» – 2 рода.

Полученная краевая задача корректно упрощена до соотношений (10) и (11). Используем

эти уравнения для преобразования их в модель в обобщенных переменных. На основе теории подобия из соотношений (10) и (11) получим:

$$\frac{N \times \eta}{W_{\text{ВП}} \times r} = 1, \quad (12)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho \times \omega^2} = 1. \quad (13)$$

Таким образом, соотношение (12) является числом энергетического действия, характеризующего специфику электродинамических аппаратов [26], а (13) – это безразмерная форма давления, известное число Эйлера. Связь между полученными числами подобия отражает особенности выпаривания в электромагнитных полях и выглядит в виде уравнения в обобщенных переменных:

$$Bu = A \times Eu^n. \quad (14)$$

По соотношению (14) можно выполнять конструктивный расчет – определять необходимые параметры электродинамических систем при заданной паропроизводительности. Можно выполнять поверочный расчет для оценки режимных параметров.

На основе «метода анализа размерностей» можно получить другую комбинацию безразмерных комплексов. Система дифференциальных уравнений (5–11) выделяет ключевые параметры, которые характеризуют процесс выпаривания в электродинамическом аппарате: мощность микроволнового поля N ; паропроизводительность W ; давление P ; удельная теплота парообразования r и скорость движения раствора ω . Все эти 5 параметров приведены к трем основным размерностям – длине, массе и времени. И согласно второй теореме подобия Федермана-Бекингема, процесс описывается двумя безразмерными комплексами:

$$\frac{W \times v}{P} = A \times \left(\frac{N}{W \times r} \right)^m. \quad (15)$$

Первый безразмерный комплекс в (15) является новым, он имеет технологический характер. Комплекс показывает соотношение инерционных сил раствора и статических сил в аппарате. Второй комплекс – число энергетического воздействия (число Bu), которое удачно обобщало результаты экспериментального моделирования процессов массопереноса в микроволновом поле [26].

В практических задачах может быть использована и другая комбинация безразмерных комплексов:

$$Bu = A \times P^n \times R^m. \quad (16)$$

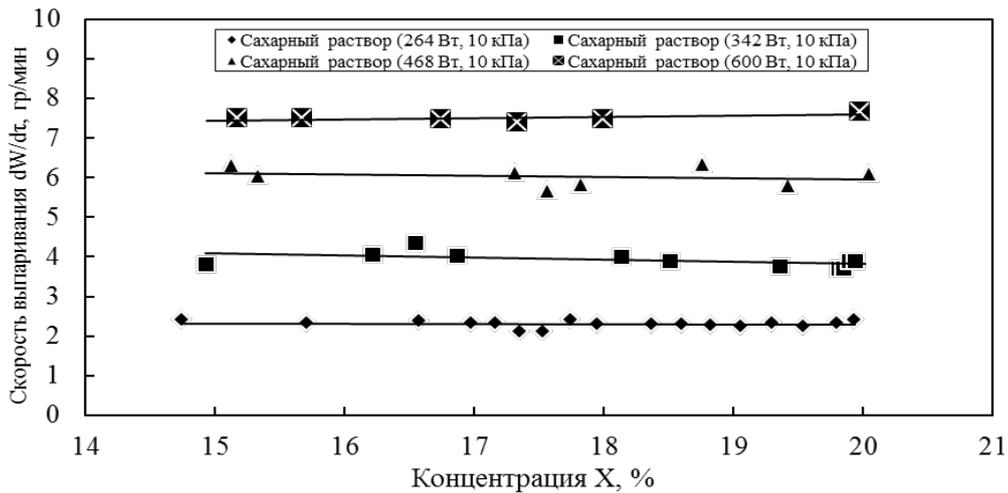


Рис. 4. Влияние мощности электромагнитного поля на скорость выпаривания сахарного раствора.

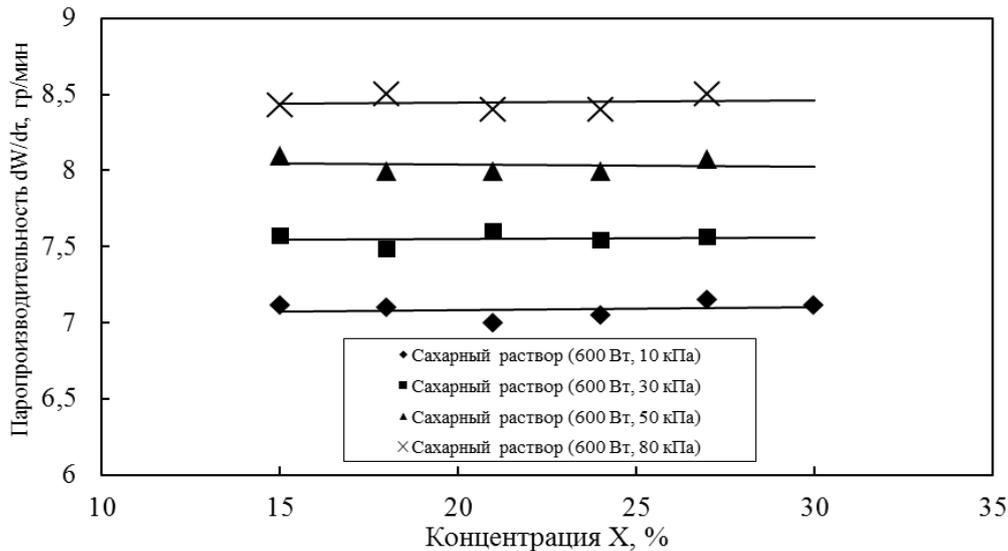


Рис. 5. Влияние давления на паропроизводительность.

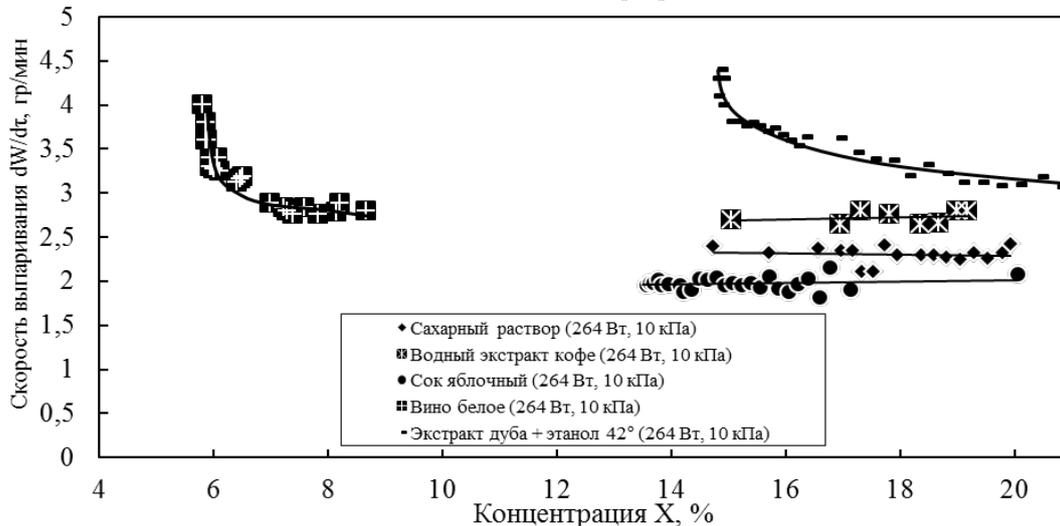


Рис. 6. Влияние типа продукта на скорости выпаривания.

В (16) принято: P – отношение текущего давления в аппарате к базовому, а R – отношение удельных значений теплоты фазового перехода исследуемого раствора к базовому. Из полученного значения числа Vi можно рассчитать: либо необходимую общую мощность (при заданной паропроизводительности), либо

производительность аппарата при известной мощности электромагнитных генераторов.

Выполненные исследования определяют задачи экспериментального моделирования: установить константы в полученных критериальных уравнениях и оценить погрешности обобщения по этим моделям.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И СТЕНДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились в три серии. Первые две заключались в определении влияния уровня подводимой мощности и степени разряжения на паропроизводительность модуля. В качестве исходного продукта выбран сахарный раствор с начальной концентрацией 15 °brix. На этом объекте опыты можно проводить в широком диапазоне температур, поскольку длительная термическая нагрузка не является критичной для данного типа сырья. Третья серия – это исследования влияния типа продукта на паропроизводительность при постоянных максимальных значениях уровня подводимой мощности и вакуума. Классификация жидких гомогенных систем проводилась по типу растворителя на водо- и спиртосодержащие. В качестве водосодержащих были использованы: водный экстракт кофе и яблочный сок. К спиртосодержащим отнесены вино белое и водоспиртовой экстракт дуба (42% этанола).

Изменения паропроизводительности модуля четко коррелируются с уровнем подводимой мощности. Постоянные скорости объясняются особенностями объемного подвода энергии при использовании электромагнитного поля (рис. 4).

Следующая серия опытов направлена на изучение влияния уровня давления (рис. 5) и типа продукта (рис. 6) на кинетику выпаривания сахарного раствора.

При проведении опытов мощность подводимой энергии оставалась постоянной. Инструментом управления уровнем давления в системе являлся режим работы конденсатора – дистиллятора. Последовательное повышение давления в системе достигалось путем снижения мощности конденсатора – уменьшением расхода охлаждающей воды и повышением ее температуры.

Увеличение паропроизводительности с ростом давления (рис. 5) объясняется снижением удельной теплоты парообразования.

Анализ результатов экспериментов свидетельствует, что выдвинутые гипотезы справедливы. Основным фактором, влияющим на паропроизводительность электродинамического аппарата, является мощность электромагнитного поля (рис. 4). Корректной является и классификация растворов по удельной теплоте парообразования. Это подтверждают результаты опытов (рис. 6). Вино, которое содержит только 8% этанола, быстро выходит на уровень водных растворов. Кинетика выпаривания экстракта дуба, в котором 42% этанола, характеризуется

пологим переходом к уровню водных растворов (рис. 6).

Обработка базы экспериментальных данных показала, что рассмотренная выше критериальная модель (16) удачно обобщает результаты опытов. Установлены константы при безразмерных переменных:

$$Vu = 1,73 \times P^{0,07} \times R^{-0,2}. \quad (17)$$

Модель (17) в диапазоне безразмерного давления $2 \leq P \leq 22$ и при уровне безразмерной теплоты фазового перехода $1 \leq R \leq 5$ обеспечивает точность расчета с максимальным отклонением в $\pm 8\%$ и рекомендуется для проектирования и оптимизации электродинамических выпарных аппаратов.

Проведены исследования концентрата экстракта из кофейного шлама, полученного в экспериментальном модуле микроволнового аппарата.

Пробу массой 0,05 г растворили в 1 мл метанола, полученный раствор анализировали на хромато-масс-спектрометре Agilent 6890 с масс-селективным детектором 5975 Inert MSD при следующих условиях: колонка длиной 30 м, диаметр – 0,25 мм, слой фазы – 0,25 мкм, газ-носитель гелий, постоянный поток 1,0 мл/мин. Температура испарения $T = 280$ °С. Термостат $T_{нач} = 100$ °С, выдержка 2 мин, затем нагревание 15°С/мин; $T_{кон} = 280$ °С, выдержка 2 мин, энергия ионизации 70 эВ. Температура ионного источника $T = 230$ °С. Температура квадруполя $T = 150$ °С, объем введенной пробы 1 мкл.

После прохождения хромато-масс системы получена хроматограмма с пиками, характерными для кофеина (рис. 7).

После сопоставления хроматограммы экстракта с масс-спектром кофеина было определено, что его содержание в экстрагированной части после выпаривания в разработанном аппарате составляет 97,7%.

Таким образом, испытания микроволнового модуля показали его работоспособность на разных видах продуктов (рис. 6) и в широком диапазоне давлений (рис. 5). Если задачей модуля считается повышение концентрации раствора в 2 раза (как на рис. 5), то исходный раствор с концентрацией в 11–12% в трехступенчатой установке повысит концентрацию до 88–95%. При этом в первой ступени будет работать 4 модуля, во второй – 2, а в третьей – 1. Реализация технологии адресной доставки энергии непосредственно к полярным молекулам раствора с помощью электромагнитного поля снимает все ограничения, присущие традиционным технологиям выпарки (таблица).

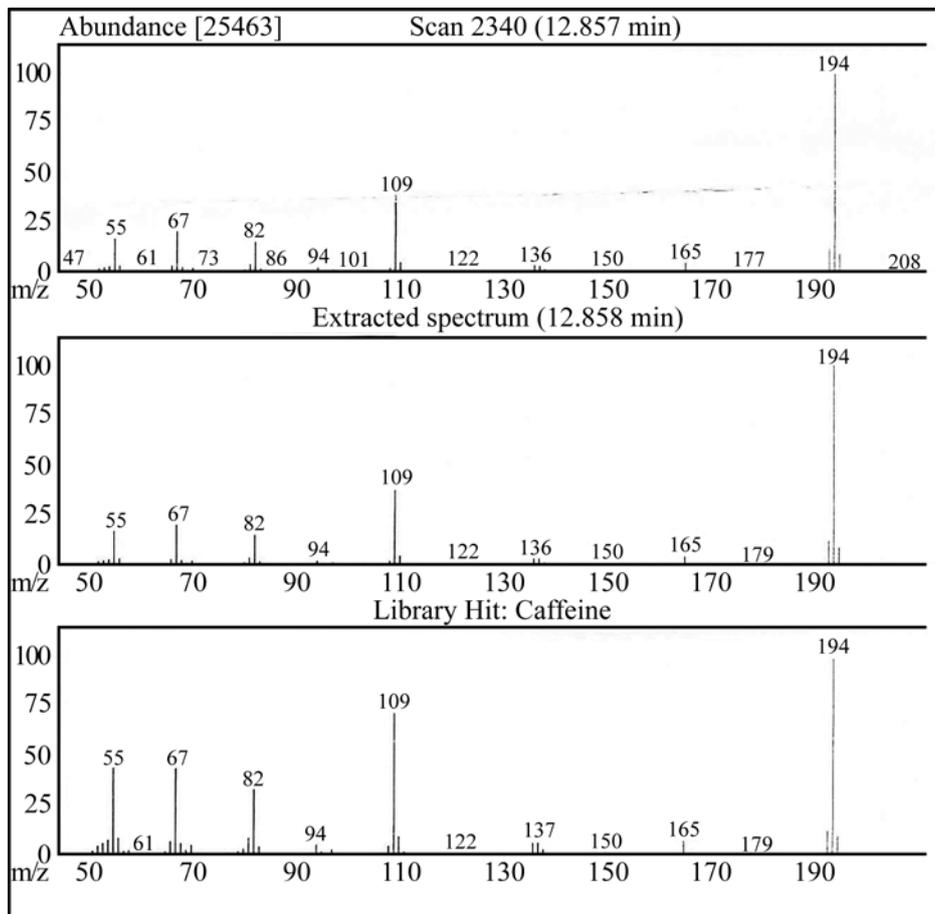


Рис. 7. Результаты газовой хромато-масс-спектрометрии концентрированного экстракта кофейного шлама.

Процесс протекает не в условиях традиционной теплопередачи, а при объемной генерации паровой фазы. Это позволяет не только получать высококачественный продукт при стабильной паропроизводительности (рис. 5), но и избежать необходимости второго этапа концентрирования – энергоемкой сушки. Поэтому схема конверсии энергии (рис. 1) позволяет с помощью электродинамического выпаривания осуществлять процесс при удельных затратах энергии 2,7 МДж на 1 кг испаренной влаги. Следовательно, поставленная в работе задача создания энергоэффективного аппарата для концентрирования растворов выполнена.

ВЫВОДЫ

Современная пищевая индустрия столкнулась с серьезными проблемами. При стабильном повышении спроса на продукты длительного хранения и концентраты растут цены на энергоносители и повышаются требования к качеству, экологической безопасности концентрата и технологии. Традиционное оборудование, которое производит концентраты, базируется на процессах теплопередачи (при выпаривании растворов) и диффузии (при дальнейшей их сушке). Механизмы процесса выпаривания ограничивают конечные концентрации продукта,

а диффузии – требуют высоких затрат энергии. Резервы их энергетической эффективности исчерпаны. Используемые в работе технологии адресной доставки энергии на основе электромагнитных генераторов микроволнового диапазона позволили создать энергоэффективный аппарат практически без ограничений по значению конечной концентрации готового продукта. Отличительной чертой аппарата являются источники не поверхностного, а объемного подвода энергии, что позволяет осуществлять точечную доставку энергии к полярным молекулам растворителя и переводить их в паровую фазу во всем объеме раствора. Разработанный электродинамический выпарной аппарат обеспечивает концентрацию продукта до 90 % при температурах до 40 °С и затратах энергии до 2,7 МДж на 1 кг испаренной влаги. Стендовые испытания модуля микроволнового выпарного аппарата доказали, что паропроизводительность сохраняется стабильной во всем диапазоне концентраций. Хроматографические исследования концентрата, полученного в электродинамическом выпарном аппарате, подтвердили высокие качественные показатели готового продукта. Выпарные аппараты электродинамического типа имеют межотраслевые перспективы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kamiński, J., Leduc, G., Energy efficiency improvement options for the EU food industry. *Polityka energetyczna*, 2010, vol. 13, p. 81. doi: 2790/158316
2. Vittuari, M., De Menna, F., Pagani, M., The Hidden Burden of Food Waste: the Double Energy Waste in Italy, *Energies*, 2016, vol. 9, p. 660. doi: 10.3390/en9080660
3. Wang, L., Energy efficiency technologies for sustainable food processing, *Energ. Effic.*, 2014, vol. 7, p. 791. doi: 0.1007/s12053-014-9256-8
4. Suleimenova, M.S., Kulazhanov, T.K., Akhmetova, S.O., Daribayev, Z.E., et al., Food security and ecological safety of megalopolis: a case study analysis, *J Secur. Sustain.*, 2018, vol. 7, no. 3, p. 495. doi: 10.9770/jssi.2018.7.3(10)
5. Hnin Kay, Khaing, Zhang Min, Mujumdar, Arun, S., et al., Emerging food drying technologies with energy saving characteristics: A review, *Dry. Technol.*, 2019, vol. 37, no. 12, p. 1465. doi: 10.1080/07373937.2018.1510417
6. Kumar, Y., Tiwari, S., Belorkar Seema, A., Drying: An Excellent Method for Food Preservation, *I.J.E.S.T.A.*, 2015, vol. 1, no. 8, p. 1.
7. Arefin, A., Mallik, A., Sonmoy, K., Nahian, S.R.A.I., et al., Drying and Dehydration Technologies: A Compact Review on Advance Food Science, *Research & Reviews: J. of Food and Dairy Technology*, 2017, vol. 5, no. 4, p. 37. doi: 10.15406/mojfpt.2018.06.00142
8. Chantasiriwan, S., Increased Energy Efficiency of a Backward-Feed Multiple-Effect Evaporator Compared with a Forward-Feed Multiple-Effect Evaporator in the Cogeneration System of a Sugar Factory, *Processes*, 2020, vol. 8, p. 342. doi: 10.3390/pr8030342
9. Assawarachan, R., Noomhorm, A., Change in color and rheological behavior of pineapple concentrate through various evaporation methods, *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2010, vol. 3, no. 1, p. 1.
10. Guiné, R.P.F., *Food Drying and Dehydration: Technology and Effect on Food Properties*, Germany: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co, 2015. 95 p.
11. Beigi, M., Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying, *Food Sci. Technol., (Campinas)*, 2016, vol. 36, no. 1, p. 145. doi: 10.1590/1678-457X.0068
12. Cheng, F., Zhou, X., Liu, Ya., Methods for Improvement of the Thermal Efficiency during Spray Drying, *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 53. doi: 10.1051/e3sconf/20185301031.
13. Zhou, X., Wang, S., Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review, *Drying Technology*, 2018, т. 37, № 3, p. 271. doi: 10.1080/07373937.2018.1452255.
14. Buyanova, I.V., Altukhov, I.V., Tsuglenok, N.V., Krieger, O.V., et al., Pulsed infrared radiation for drying raw materials of plant and animal origin, *Foods Raw Mater.*, 2019, vol. 7, no. 1, p. 151. doi: 10.21603/2308-4057-2019-1-151-160.
15. Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., Wang, S., Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables, *Trends Food Sci. Technol.*, 2006, vol. 17, no. 10, p. 524. doi: 10.1016/j.tifs.2006.04.011
16. Рушиц, А.А., Щербакова, Е.И., Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании, *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*, 2014, т. 2, № 1, с. 9.
17. Romano, V., Apicella, R., Microwave Heating of Liquid Foods, *Engineering*, 2015, vol. 7, p. 297. doi: 10.4236/eng.2015.76026
18. Wray, D., Ramaswamy, H.S., Microwave-Osmotic/Microwave-Vacuum Drying of Whole Cranberries: Comparison with Other Methods, *J. Food Sci.*, 2015, т. 80, № 12, p. 2792.
19. Потапов, В.О., Ефремов, Ю.И., Михайлова, С.В., Дослідження процесів вакуумного мікрохвильового концентрування та сушіння прямої сировини, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2014, т. 10, № 1, с. 36.
20. Adarsh, M., Kalla Devaraju, R., Microwave energy and its application in food industry: A review, *Asian J. Dairy Food Res.*, 2017, vol. 36, no. 1, p. 37. doi: 10.18805/ajdfr.v01i0F.7303
21. Бурдо, О.Г., Терзиев, С.Г., Гаврилов, А.В., Сиротюк, И.В. и др., Система инновационных энерготехнологий обезвоживания пищевого сырья, *Проблемы региональной энергетики*, 2020, т. 46, № 1, с. 92. doi: 10.5281/zenodo.3898317
22. Curko, N., Kelsin, K., Verica, D.-U., Valinger, D., et al., Microwave-Assisted Extraction of Different Groups of Phenolic Compounds from Grape Skin Pomaces: Modeling and Optimization, *Polish J. Food Nutr. Sci.*, 2019, vol. 69, p. 235. doi: 10.31883/pjfn/109423
23. Casassa, L., Sari, S., Bolcato, E., Fanzone, M., Microwave-Assisted Extraction Applied to Merlot Grapes with Contrasting Maturity Levels: Effects on Phenolic Chemistry and Wine Color, *Fermentation*, 2019, vol. 5, no. 1, p. 15. doi: 10.3390/fermentation5010015.
24. Kusuma, H., Putri, D., Treisty, I., Mahfud, M., Comparison of Microwave Hydrodistillation and Solvent-Free Microwave Extraction for Extraction of Agarwood Oil, *Chiang Mai J. of Science*, 2019, т. 46, p. 741.
25. Çelen, S., Effect of Microwave Drying on the Drying Characteristics, Color, Microstructure, and Thermal Properties of Trabzon Persimmon, *Foods*, 2019, т. 8, p. 84. doi: 10.3390/foods8020084
26. Бурдо, О.Г., Тришин, Ф.А., Гаврилов, А.В., Сиротюк, И.В., Электродинамические технологии – эффективное решение проблем пищевой индустрии, *ЭОМ*, 2020, т. 56, № 3–4, с. 74. doi: 10.5281/zenodo.3970438

Summary

The results of complex research of electrodynamic vacuum evaporators are presented. The scientific and technical concept of the directed energy action technology applicable to apparatuses of the electrodynamic type is substantiated. A system analysis of the energies of traditional dehydration equipment is given. Their technological and energy problems are determined by the electrothermal analogy method. It is shown how these problems are solved in the electrodynamic type apparatuses. A physical scheme and a mathematical model of a electrodynamic continuous operation vacuum evaporator are developed. Assumptions that take into account the specifics of evaporation in an electromagnetic field are formulated. A system of differential equations that defines the solution interaction with an electro-

magnetic field in vacuum is presented. A nonstationary model is transformed into relations in dimensionless variables using the methods of similarity theory and the "dimension analysis". The tasks of experimental modeling are defined. The results of complex experimental studies of microwave vacuum evaporators are presented. The influence of the electromagnetic field power, the solution type and concentration, and the pressure level on the steam output is established. Constants of the equation in generalized variables, which, with an error within 8%, establishes the relationship of the number of energy actions with dimensionless complexes that characterize the technological parameters, are defined.

Keywords: electrodynamic apparatus, food energy technologies, evaporation, analytical modeling, experimental and chromatographic researches