

УДК 663.933.061- 027.332:537-962

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ РАСТВОРОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ВАКУУМ-ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ

Бурдо О.Г., д.т.н., профессор, Ружицкая Н. В., к.т.н., Резниченко Т. А., аспирант,  
Резниченко Д. Н., аспирант

Одесская национальная академия пищевых технологий

## MODELING OF PROCESS OF FOOD SOLUTIONS CONCENTRATION IN MICROWAVE VACUUM EVAPORATOR

Burdo O.G., Ruzhitskaya N. V., Reznichenko T. A., Reznichenko D. N.  
Odessa National Academy of Food Technoogies

Copyright © 2017 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**Аннотация.** В статье рассмотрены микроволновые технологии интенсификации процессов концентрирования экстрактов ароматических и биологически-активных веществ. Для интенсификации процесса вакуум-выпарки предлагается обеспечить равномерность подвода энергии и исключить промежуточный теплоноситель за счет использования микроволновых технологий. Это основано на том факте, что микроволны действуют в первую очередь на молекулы полярного растворителя, такого как вода. Использование микроволновых технологий может обеспечить объемный подвод энергии к продукту. Приведены результаты экспериментальных исследований концентрирования экстрактов *Stevia Rebaudiana*, кофе, растворов сахара и NaCl. Эксперименты проводились при давлении 0,009...0,011 МПа, температура процесса не превышала 50 °С. Установлено, что разница расходов конденсата для рассмотренных растворов незначительна. В качестве модельного раствора использовался раствор сахара. Показано влияние удельного энергоподвода, давления в аппарате, площади поверхности испарения на интенсивность процесса концентрирования пищевых продуктов на примере раствора сахара. Интенсивность процесса оценивалась по среднему расходу конденсата. Скорость протекания процессов выпаривания в условиях микроволнового подвода энергии определяется сложными взаимодействиями многих факторов, учесть которые в одной универсальной для всех случаев модели невозможно. Методом анализа размерностей установлен общий вид критериального уравнения процесса. В общем виде на производительность аппарата по конденсату влияют количество микроволновой энергии, удельная теплота парообразования растворителя, который удаляется, плотность растворителя, площадь зеркала продукта в аппарате, уровень продукта в аппарате, объем продукта, давление в аппарате и окружающей среды. Число энергетического действия, которое устанавливает соотношение мощности микроволнового поля и энергии, которая необходима для перевода растворителя в пар, определяется безразмерным критерием площади и безразмерным давлением в аппарате. В результате обработки экспериментальных данных получены коэффициенты критериального уравнения.

**Abstract.** In current paper microwave technologies of flavor and biologically active substances extracts concentration intensification are considered. For vacuum evaporation process intensification it is offered to provide energy supply evenness and exclude intermediate heat medium by microwave technologies. It is based on the fact that microwave energy acts directly on molecules of polar solvent, such as water for most dry substances are transparent to radio waves. Use of microwave technology can provide volumetric energy supply to product. The results of experimental researches of coffee, *Stevia Rebaudiana* extracts and sugar and NaCl solutions concentration are given. Laboratory tests were executed at pressure 0,009...0,011 MPa and temperature about 50 °C. It is found out that difference between condensate rates for considered solutions is not essential. Sugar solution of 5% concentration was used as a model solution. The influence of specific energy supply, pressure in the apparatus, evaporation surface area on food products concentration process is shown on the example of sugar solution. The most essential influence on process rate is caused by energy supply and evaporation surface. Process intensity was estimated by condensate average rate. The rate of evaporation processes under microwave energy supply conditions is determined by complex interactions of various factors to take into account which is difficult in one model suitable for all cases is impossible. General form of process criterion equation is established by the method of dimensional analysis. In general view microwave energy quantity, solvent specific heat of vaporization, solvent density, product mirror surface, product level in apparatus, product volume, pressure in apparatus and environment affect apparatus productivity. Energy action number which determines the ratio of microwave field power and energy that is necessary for solvent conversion to vapour, is determined by dimensionless surface criterion and dimensionless pressure in apparatus. As a result of experimental data processing the coefficients of criterion equation are received.

**Ключевые слова:** микроволновое поле, вакуум-выпарные аппараты, сахарные растворы, стевия.

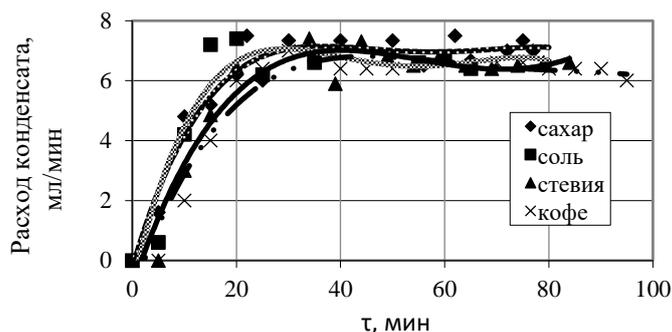
**Keywords:** microwave field, vacuum evaporators, sugar solutions, stevia.

**Введение.** Процесс выпарки является ключевым в технологиях целого ряда пищевых продуктов. Известно, что теплопроводность пищевых продуктов (соки, экстракты) с увеличением содержания сухих веществ понижается. За счет этого в большинстве существующих выпарных аппаратов не обеспечивается равномерный подвод энергии к продукту, что ведет к его «пригоранию», т.е. термическому повреждению, а также снижает энергетическую эффективность процесса [1].

В то же время низкие температуры обработки не позволяют инактивировать всю патогенную микрофлору в продукте, что снижает сроки его хранения и вынуждает использовать консерванты. Ряд работ подтверждает эффективность низкотемпературной пастеризации и стерилизации пищевых продуктов в микроволновом поле [2]. Кроме того микроволновое поле, воздействуя на полярные молекулы сырья (вода, этанол и т.п.) инициируют особый бародиффузионный поток экстрактивных веществ из микро- и наноструктур сырья в экстрагент. За счет явления бародиффузии разрушаются клеточные стенки сырья, а также турбулизуется пограничный слой [3].

При концентрировании выпариванием проблему равномерности подвода энергии также можно решить с использованием микроволновых технологий.

При микроволновом подводе энергии подводится непосредственно к молекулам воды в продукте, так как сухие вещества как правило радиопрозрачны. Очаги парообразования возникают во всем объеме и выполняют функцию греющей поверхности. Таким образом осуществляется объемный подвод энергии к раствору. Реализуется схема



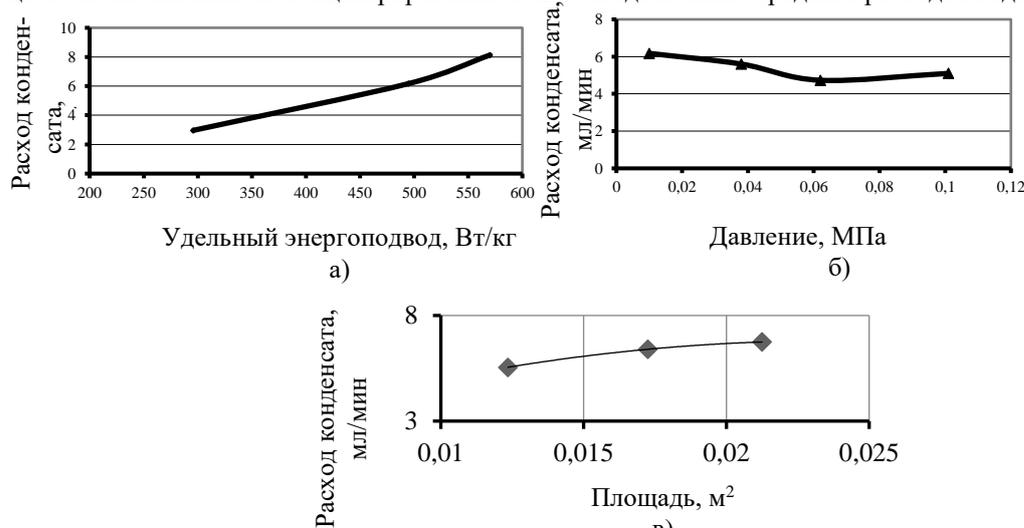
**Рис. 1. Зависимость расхода конденсата от характера раствора.**

подвода энергии, показавшая высокую эффективность в технологиях сушки [4, 5].

**Основная часть.** Технологии микроволновой вакуум-выпарки были применены для концентрирования экстрактов стевии *Stevia Rebaudiana* – природного сахарозаменителя, кофейного экстракта, растворов сахара и NaCl (рис. 1). Эксперименты проводились при давлении 0,009...0,011 МПа, температура процесса не превышала 50 °С.

Как видно из графиков, разница расходов конденсата для рассмотренных растворов незначительна. Таким образом модельным раствором для изучения влияния на кинетику концентрирования таких факторов как давление в аппарате, удельный энергоподвод, площадь поверхности испарения в аппарате был выбран сахарный раствор начальной концентрацией 5 %.

Отмечено, что во всех опытах расход конденсата в течение 10...20 минут достигал постоянных значений, т.е. установка выходит на стационарный режим. Таким образом наглядно оценить влияние параметров процесса на интенсивность концентрирования можно введя понятие среднего расхода конденсата (рис. 2).



**Рис. 2. Влияние параметров процесса на средний расход конденсата.**  
а) удельный энергоподвод; б) давление; в) площадь поверхности испарения

Исследование влияния удельного энергоподвода проводилось при давлении 0,009 МПа и площади зеркала 0,02 м<sup>2</sup>. Изучение влияния давления в аппарате и площади поверхности испарения проводилось при удельном энергоподводе 495 Вт/кг. Установлено, что увеличение поверхности испарения при постоянном объеме продукта ведет к увеличению расхода конденсата.

Полученная база экспериментальных данных была использована для построения математической модели процесса.

Скорость протекания процессов выпаривания в условиях микроволнового подвода энергии определяется сложными взаимодействиями многих факторов, учесть которые в одной универсальной для всех случаев модели невозможно.

Получить структуру критериального уравнения для расчета микроволновых вакуум-выпарных аппаратов периодического действия можно методом анализа размерностей [6].

В общем виде на производительность аппарата по конденсату  $v$  влияют количество микроволновой энергии  $N$ , удельная теплота парообразования растворителя, который удаляется  $r$ , плотность растворителя  $\rho$ , площадь зеркала продукта в аппарате  $S$ , уровень продукта в аппарате  $h$ , объем продукта  $V_{np}$ , давление в аппарате и окружающей среды  $P$  и  $P_0$ . Тогда получаем следующую зависимость в общем виде:

$$v = f(N, r, \rho, S, h, V_{np}, P, P_0). \quad (1)$$

Перечень параметров приведен в табл. 1.

**Таблица 1 – Список параметров**

Параметр	Символ	Размерность
Производительность установки по конденсату	$v$	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
Плотность растворителя	$\rho$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Площадь поверхности продукта	$S$	$\text{м}^2$
Уровень продукта в аппарате	$h$	$\text{м}$
Давление в аппарате	$P$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Базовое давление	$P_0$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность микроволнового поля	$N$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$
Объем продукта	$V_{np}$	$\text{м}^3$
Удельная теплота парообразования растворителя	$r$	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$

Все параметры состоят из трех основных размерностей: длины (м), массы (кг) и времени (с). Используя метод анализа размерностей можно функцию (1) заменить зависимостью между числами подобия. Согласно  $\pi$ -теореме определяем количество безразмерных комплексов, которые описывают процесс. Поскольку число переменных  $n = 9$ , число единиц измерения  $m = 3$ , количество безразмерных комплексов, которые описывают процесс равняется  $(n - m) = 6$ .

Приведем функцию в степенном виде:

$$v = A N^a r^b \rho^c S^d h^e V_{np}^f P^g P_0^n. \quad (2)$$

Составляем уравнение размерностей:

$$\frac{\text{м}^3}{\text{с}} = \left( \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3} \right)^a \cdot \left( \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right)^b \cdot \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)^c \cdot (\text{м}^2)^d \cdot (\text{м})^e \cdot (\text{м}^3)^f \cdot \left( \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \right)^g \cdot \left( \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \right)^n \quad (3)$$

Составляем матрицу размерностей для уравнения (2):

**Таблица 2 – Матрица размерностей**

	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$g$	$n$	$v$
м	2	2	-3	2	1	3	-1	-1	3
кг	1		1				1	-1	0
с	-3	-2					-2	-2	-1

Составляем систему уравнений для основных единиц:

$$\begin{array}{l} \text{к} \\ \text{г} \\ \text{с} \end{array} \left| \begin{array}{l} 3 = 2a + 2b - 3c + 2d + e + 3f - g - n \\ -1 = -3a - 2b - 2g - 2n \\ 0 = a + c + g - n \end{array} \right.$$

В этой системе 8 неизвестных. Любые три из них можно выразить через четвертую. Так во втором

уравнении выражаем через остальные множители:

$$n = a + c + g .$$

Из третьего уравнения найдем  $e$ , и подставив  $d$  получаем:

$$b = -2,5a - 2g - c + 0,5 .$$

Из первого уравнения:

$$e = 2 + 2a + 2g + 4c - 2d - 3f .$$

Перепишем уравнение (2) в следующем виде:

$$v = A \cdot N^a, r^{2,5a-2g-c+0,5}, \rho^c, S^d, h^{2+2a+2g+4c-2d-3f}, V^f, P^g, P_0^{a+c+g} . \quad (4)$$

Объединяем параметры по одинаковым показателям степени:

$$v \cdot r^{0,5} h^2 = A \cdot \left( \frac{N \cdot h^2 \cdot P_0}{r^{2,5}} \right)^a \cdot \left( \frac{\rho \cdot h^4 \cdot P_0}{r} \right)^c \cdot \left( \frac{S}{h^2} \right)^d \cdot \left( \frac{V}{h^3} \right)^f \cdot \left( \frac{P \cdot P_0 \cdot h^2}{r^2} \right)^g \quad (5)$$

Комплексы, полученные в уравнении (5) используем для поиска комбинаций, которые дадут структуру критериального уравнения.

$$\frac{h^2 \cdot r^{0,5}}{v} \cdot \frac{N \cdot h^2 \cdot P_0}{r^{2,5}} \cdot \frac{r}{\rho \cdot h^4 \cdot P_0} = \frac{N}{v \cdot r \cdot \rho} = \text{Bu} . \quad (6)$$

$$\left( \frac{S}{h^2} \right) \cdot \left( \frac{h^3}{V} \right) = \frac{S \cdot h}{V} = F . \quad (7)$$

Комплекс  $F$  – учитывает влияние площади поверхности раствора.

Влияние давления учитывается комбинацией:

$$\left( \frac{P \cdot P_0 \cdot h^2}{r^2} \right) \cdot \left( \frac{P_0^2}{r^2} \right) = \frac{P}{P_0} \quad (8)$$

Таким образом получаем следующее уравнение в обобщенных переменных:

$$\text{Bu} = A \cdot (F)^n \cdot \left( \frac{P}{P_0} \right)^m , \quad (9)$$

Константы  $A, n, m$  определяются экспериментально.

Обработка массива экспериментальных данных позволяет рекомендовать для расчета процесса выпаривания в микроволновом вакуум-выпарном аппарате следующее уравнение:

$$\text{Bu} = 4,326 \cdot F^{-1,93} \cdot \left( \frac{P}{P_0} \right)^{0,12} \quad (10)$$

**Выводы.** В технологиях концентрирования растворов микроволновый подвод энергии позволяет добиться объемного подвода энергии к продукту в выпарном аппарате и исключить промежуточный теплоноситель. При этом энергия подводится непосредственно к воде (полярному экстрагенту) в продукте.

На интенсивность испарения помимо плотности подвода энергии и давления также оказывает влияние площадь поверхности испарения.

Структура критериального уравнения определена методом анализа размерностей. Число энергетического действия, которое устанавливает соотношение мощности микроволнового поля и энергии, которая необходима для перевода растворителя в пар, определяется безразмерным критерием площади и безразмерным давлением в аппарате. В результате обработки экспериментальных данных получены коэффициенты критериального уравнения. Наибольшее влияние на интенсивность выпаривания оказывают мощность микроволнового поля и площадь поверхности испарения.

#### Литература

1. Исследование вакуум-выпарных аппаратов нового типа / Бурдо О.Г. и др. // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2014. Т.2., вип. 45. С.212-214
2. Бурдо О.Г., Рыбина О.Б. Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле. О.: Полиграф, 2010. 200 с.
3. Бурдо О.Г., Ряшко Г.М. Экстрагирование в системе «кофе-вода». О.: ТЕС, 2007. 176 с.
4. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Одесса: «Полиграф», 2010. 368 с.
5. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии / Бурдо О.Г. и др. // Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов СЭТТ-2011)». 2011. Т.1. С. 422-426.

6. Бурдо О.Г., Калинин Л.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах: Учебник. Одесса: Друк, 2008. 348с.

#### References

1. Burdo O.G., Ruzhickaya N.V., Makarenko T.A., Malashevich S.A. (2014). Issledovanie vakuum-vyiparnyih apparatov novogo tipa. Naukovi pratsi ONAHT, 45, 2, 212 – 214.
2. Burdo O.G., Rybina O.B. (2010). Processy inaktivacii mikroorganizmov v mikrovolnovom pole [Processes of inactivation of microorganisms in microwave field]. Odessa: Poligraf.
3. Burdo O.G., Ryashko G.M. (2007). Ekstragirovanie v sisteme «kofe - voda» [Extraction in “coffee-water” system], Odessa: TES.
4. Burdo O.G. (2010). Evolyuciya sushil'nyh ustanovok [Dryers evolution], Poligraf, Odessa, Ukraine.
5. Burdo O.G. Terziev S.G., Yarovoj I.I., Ruzhickaya N.V. (2011). Research of module of band dryer for vegetable materials with combined electromagnetic energy supply. Trudy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye energosbergayushchie teplovye tekhnologii (sushka i termovlazhnostnaya obrabotka materialov SETT-2011)», Vol.1, Moscow, pp. 422 – 426.
6. Burdo O.G., Kalinin L.G. (2008). Prikladnoe modelirovanie protsessov perenosa v tehnologicheskikh sistemah, Odessa: Druk, 348 p.

УДК 663.938

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПРОТИТЕЧІЙНОГО ЕКСТРАКТОРА

Левтринська Ю.О., аспірант, Зиков А.В., к.т.н., доцент, Терзів С.Г., д.т.н., доцент  
Одеська національна академія харчових технологій

### MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF MICROWAVE COUNTER FLOW EXTRACTOR

Levtrinska Yu.O., postgrad. stud., Zykov A.V., Ph.D., assoc. prof., Terziev S.G., d.t.sc., assoc. prof.  
Odessa National Academy of Food Technologies

Copyright © 2017 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**Анотація.** Проаналізовано проблеми моделювання процесу екстрагування у умовах протитечійного руху екстрагенту і твердої фази в умовах мікрохвильового поля. Обґрунтовано доцільність розрахунку та оптимізації мікрохвильових екстракторів. Визначено основні параметри для розрахунку масопереносу в екстракторі. За допомогою методики аналізу розмірностей 12 шуканих параметрів зведено до 3. Узагальнено результати серії досліджень, проведених з використанням меленої кави. Отримано математичну модель у критеріальному вигляді для мікрохвильового екстрактора. Проведено порівняння чисел Стантона розрахункових та отриманих на основі експериментальних даних. Обґрунтовано вибір параметрів оптимізації. Визначено цільову функцію оптимізації. Розроблено програму оптимізації створену на базі мови програмування Borland Delphi.

**Abstract.** The problems of modeling the extraction process under the conditions of the countercurrent motion of the extractant and the solid phase in the conditions of the microwave field are analyzed. The expediency of calculation and optimization of microwave extractors is substantiated. The basic parameters for calculation of mass transfer in the extractor are determined. On input – indicators characterizing the extractant (initial and final temperature, viscosity, specific heat, density), solid phase (concentration of extractives, density, porosity and thickness of the layer, equivalent diameter of the particle), apparatus (mass and dimensions, extraction of extractant and product), power supply system (rated power, frequency and number of radiators). At the output – the concentration of the extract and specific power. The parameters for calculating the microwave extractor are determined. Using the method of analysis of the dimensions of 12 required parameters is reduced to 3. The results of a series of studies conducted with ground coffee are summarized. The results are presented in the form of tables and charts. The calculations were carried out with using the theory of similarity and dimensional analysis method. The results of calculations of the concentration differences in the solid phase and in the extract, relative error, mass flow, effective mass transfer coefficient, Reynolds and Stanton numbers, etc. are presented, under the influence of the microwave field. Dependences of the parameters