

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 663.933.061- 027.332:537-962

МИКРОВОЛНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
МАССООБМЕННЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
ПЕРЕРАБОТКЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ
MICROWAVE TECHNOLOGIES OF MASS-TRANSFER AND HEAT PROCESSES
INTENSIFICATION FOR VEGETABLE MATERIALS TREATMENT

¹Левтринская Ю. О., аспирант, ¹Ружицкая Н.В., канд. техн. наук., ассистент,

¹Резниченко Т.А., аспирант, ²Бандура В.Н., канд. техн. наук, профессор

¹Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

²Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница

¹Levtrinskaya Yu.O., ¹Ruzhitskaya N.V., ¹Reznichenko T.A., ²Bandura V.N.

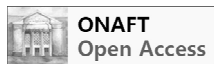
¹Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

²Vinnitsa National Agrarian University

Copyright © 2016 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/>



В статье рассмотрены микроволновые технологии интенсификации процессов экстрагирования вкусовых и ароматических компонентов из кофейного сырья и концентрирования экстрактов ароматических и биологически-активных веществ. Показано влияние микроволнового подвода энергии на выход целевого компонента из кофейных зерен *Coffea arabica* L. Установлено повышение выхода экстрактивных веществ при микроволновом подводе энергии. Показана динамика выхода целевых веществ из кофейных зерен при микроволновом и традиционном тепловом подводе энергии. Проведены исследования теплового потока в кассетах противоточного микроволнового экстрактора. Получены зависимости для влияния количества подведенной энергии, расхода экстрагента и слоя продукта в экстракторе на выход целевого компонента.

Для интенсификации процесса вакуум-выпарки предлагается обеспечить равномерность подвода энергии и исключить промежуточный теплоноситель за счет использования микроволновых технологий. Приведены результаты экспериментальных исследований концентрирования экстрактов стевии, кофе, сахара. Показано влияние удельного энергоподвода, давления в аппарате, площади поверхности испарения на скорость процесса концентрирования пищевых растворов на примере сахарного раствора.

Полученные экспериментальные зависимости могут быть использованы для дальнейшей оптимизации микроволнового экстракционного и выпарного оборудования.

In current paper microwave technologies of coffee raw taste and flavor components extraction and flavor and biologically active substances extracts concentration intensification are considered. The influence of microwave energy supply on target component yield from *Coffea arabica* L. seeds is shown. The increase of extractive substances yield under microwave energy supply is ascertained. The dynamics of target components yield from coffee seeds under microwave energy supply is shown. Researches of heat flow in counterflow microwave extractor cartridges are done. The relations for influence of energy supply, extractant flow rate, product layer thickness in extractor on target component yield. For vacuum evaporation process intensification it is offered to provide energy supply evenness and exclude intermediate heat medium by microwave technologies. The results of experimental researches of coffee, stevia extracts and sugar solutions concentration are given. The influence of specific energy supply, pressure in apparatus, evaporation surface area on process rate is shown by example of sugar solutions.

Received experimental relations can be used for further optimization of microwave extraction and vaporizing equipment.

Ключевые слова: кофе, микроволновый интенсификатор, экстрагирование, вакуум-выпарные аппараты, стевия.

Keywords: coffee, microwave intensifier, extraction, vacuum vaporizers, stevia.

Концентрированные и сухие экстракты вкусовых, ароматических и биологически активных веществ из дорогостоящего растительного сырья, обладают длительными сроками хранения, удобны для транспортировки и

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

использования как в пищевых и фармацевтических производствах, так и в быту. Основные этапы технологии получения таких концентратов это экстрагирование и удаление экстрагента (выпарка, сушка). Оба процесса характеризуются высокой энергоемкостью. Процесс экстрагирования интенсифицируется, как правило, за счет повышения температуры и давления в аппарате, что негативно сказывается на качестве продукта. В процессе концентрирования экстрактов выпариванием их теплопроводность 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.

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 [1]. 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 [2].

Предлагается использовать микроволновые технологии для интенсификации процесса экстрагирования водорастворимых вкусовых и ароматических веществ кофе.

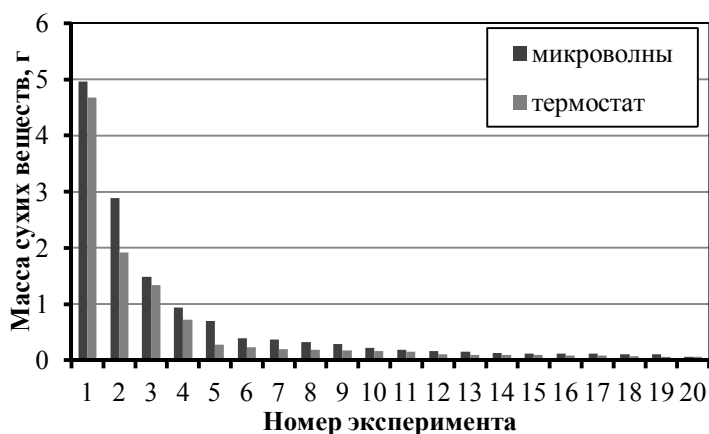


Рис. 1– Динамика истощения сухих веществ из кофейных зерен

нута. Произведено 20 заливок водой молотых кофейных зерен с диаметром частиц $\delta=1\ldots 2$ мм. Колба с продуктом нагревалась в течении 5 минут до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ для каждой точки эксперимента. В микроволновом (МВ) поле из зерен было извлечено 27,76 % сухих веществ (13,8 г), в термостате – 21,65 % (10,82 г). На рис. 1. Показана динамика истощения сухих веществ из зерен.

Качественно оценить эффективность методики экстрагирования, позволяет исследование удельных затрат на производство продукта. С целью получения экспериментальных данных были проведены исследования теплового потока в кассетах противоточного микроволнового экстрактора. Для проведения эксперимента камера экстрактора была заполнена кассетами (6 штук), через которые проходил экстрагент. Установка снабжена магнетроном с номинальной мощностью 900 Вт и предусмотрено 5 режимов работы: 10 %, 30 %, 50 %, 70 % и 100 % от номинальной мощности магнетрона. Опыты проводились с изменением расхода экстрагента в диапазоне $1,8 \ldots 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Для каждой точки эксперимента опыт проводился в течении 3 минут. Температура измерялась на выходе из шестой кассеты.

Таблица 1 – Результаты калориметрирования блока из 6-ти кассет при разном расходе и мощности

$G_i(\text{м}^3/\text{с} \cdot 10^6) \backslash P_i$	10 %	30 %	50 %	70 %	100 %
1.8	$\Delta T=4,7$ $Q=29,6 \text{ Вт}$	$\Delta T=8,1$ $Q=61,5 \text{ Вт}$	$\Delta T=20,5$ $Q=155,6 \text{ Вт}$	$\Delta T=25$ $Q=189,7 \text{ Вт}$	$\Delta T=34,5$ $Q=261,8 \text{ Вт}$
3,7	$\Delta T=3,9$ $Q=37,3 \text{ Вт}$	$\Delta T=7,5$ $Q=98,9 \text{ Вт}$	$\Delta T=13,2$ $Q=202,2 \text{ Вт}$	$\Delta T=18,8$ $Q=336,2 \text{ Вт}$	$\Delta T=30$ $Q=512,1 \text{ Вт}$
5,6	$\Delta T=1,7$ $Q=72,5 \text{ Вт}$	$\Delta T=4,5$ $Q=117,3 \text{ Вт}$	$\Delta T=9,2$ $Q=203,7 \text{ Вт}$	$\Delta T=15,3$ $Q=290,1 \text{ Вт}$	$\Delta T=34,5$ $Q=462,9 \text{ Вт}$
15	$\Delta T=1,1$ $Q=68,9 \text{ Вт}$	$\Delta T=3,3$ $Q=206,8 \text{ Вт}$	$\Delta T=4,3$ $Q=269,5 \text{ Вт}$	$\Delta T=8,8$ $Q=551,4 \text{ Вт}$	$\Delta T=17,9$ $Q=821,6 \text{ Вт}$

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

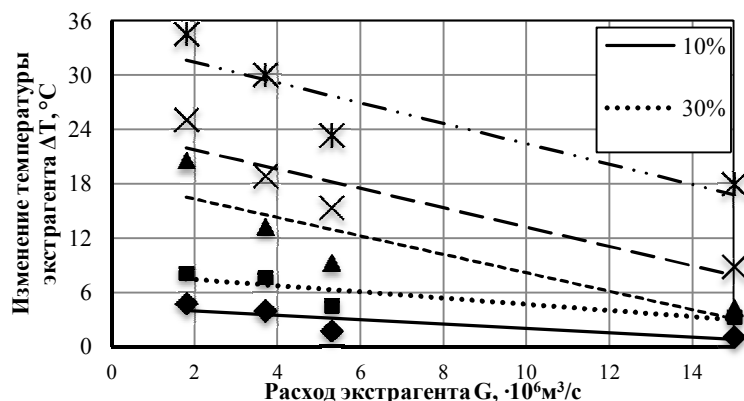


Рис. 2 – Температури на выходе из блока кассет при разном расходе экстрагента

С увеличением расхода экстрагента снижается температура на выходе из блока кассет микроволнового экстрактора, экстрагент не успевает значительно нагреться. Для интенсификации экстрагирования из растительного сырья необходимо повышение температуры, так как с ее повышением улучшается растворимость веществ, которые находятся в сырье, меняется вязкость экстрагента, что позволяет ему более эффективно проникать в капилляры сырья. Однако, перегрев экстракта приводит к деградации биологически-активных компонентов, ухудшению органолептических качеств готового продукта [3, 4].

Для того, чтобы исследовать распределение температур в блоке кассет МВ экстрактора были сняты показания температур в каждой кассете блока К6. Самые высокие значения температур достигались в нижней кассете блока. Верхние кассеты блока, в том числе кассета К3, которая находится напротив магнетрона, нагревается слабее за счет постоянного притока холодного экстрагента (рис. 2 – 4).

Таблица 2 – Распределение температур в кассетах в одной камере МВ экстрактора при максимальной мощности магнетрона

$\Delta T \backslash G (\text{м}^3/\text{с} \cdot 10^6)$	15	6	4	3	1,75	1,2
K1	4,1	5,6	8,6	7,3	10	28,4
K2	5,7	6,2	10,7	9,5	16,1	30,3
K3	6,2	10	16,3	18,3	21,4	35,4
K4	9,3	15,3	18,6	20,9	28,1	45,4
K5	14,1	19,5	24,2	25,5	36	46,4
K6	15,5	22,7	25,9	29,3	39,2	49,4

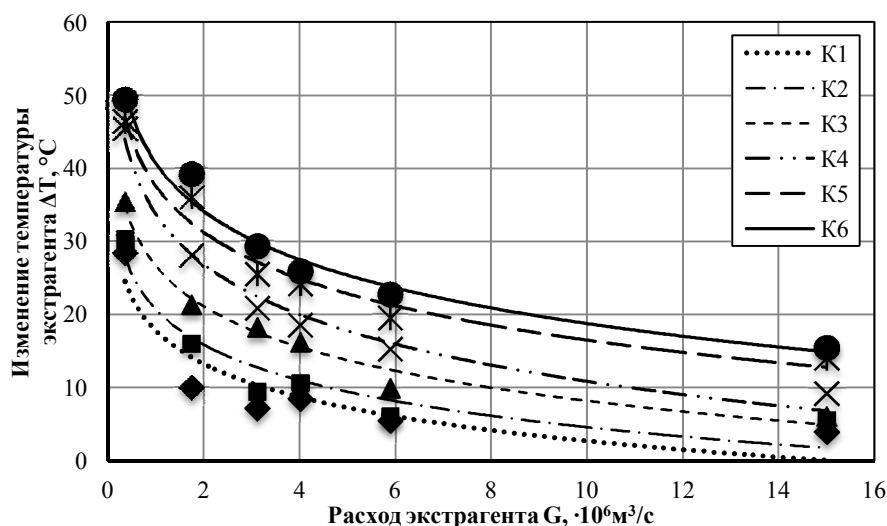


Рис. 3 – Термограмма распределения температур в кассетах МВ экстрактора при разном расходе

Также был проведен эксперимент по определению температуры в кассете с продуктом при разных режимах работы МВ экстрактора. Для эксперимента использовался молотый кофе ($m=50$ г, $\delta=1...2$ мм) при расходе $G=1,2 \cdot 10^6$ м³/с и начальной температуре экстрагента 20°C. На термограммах процесса видно, что при неизменном расходе температура выходит на некоторый установившийся уровень. Следует отметить, что для режимов

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

работы магнетрона 70 % и 100 % характерным при данном расходе был перегрев кассеты и закипание в ней экстрагента.

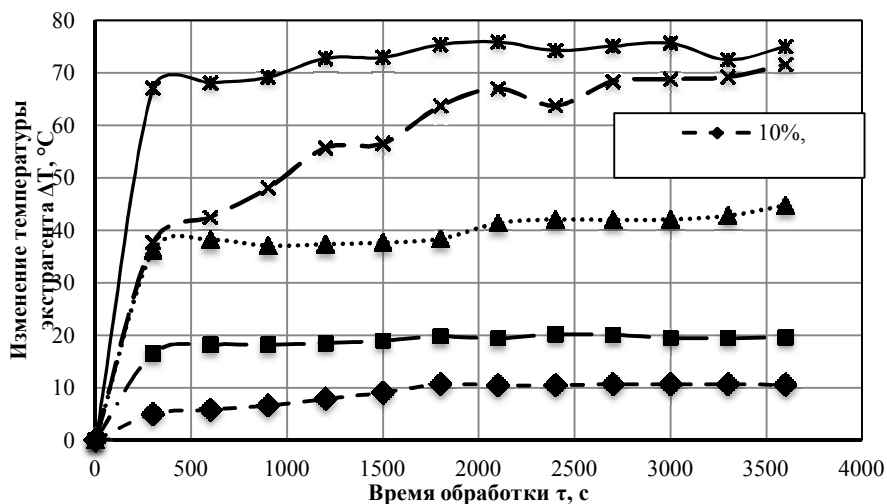


Рис. 4 – Изменение температур в кассете с продуктом при разных режимах работы микроволновой камеры

Для получения кофейного экстракта богатого ароматическими и биологически активными веществами нежелательно повышение температуры выше 100 °С. Согласно литературным данным, при обработке натурального молотого кофе желательно, чтобы вода имела температуру 50...80 °С [4-6]. При перегреве кофейный напиток приобретает неприятный резкий вкус, а летучие ароматические компоненты покидают экстракт [4].

Исследование влияния мощности и расхода на температурный режим в кассетах с продуктом свидетельствует, что для того, чтобы он соответствовал технологическим требованиям и позволял получать качественный продукт необходимо учитывать, что при уменьшении расхода продукт сильнее нагревается и необходимо избегать повышения мощности при уменьшении расхода. С целью определения полноты извлечения сухих веществ из кофе ($m=50$ г, $\delta=1...2$ мм) при разном расходе были проведены эксперименты при режиме работы микроволновой камеры 30 %. Результаты экспериментов показаны на рис. 5. При малом расходе экстрагента обеспечивается более полное извлечение сухих веществ из сырья, а сам экстракт более насыщен, что упрощает его последующую переработку.

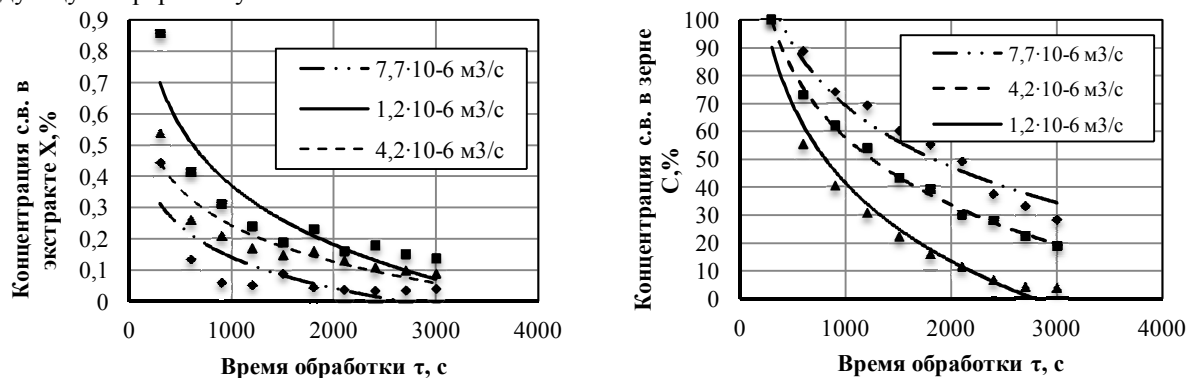


Рис. 5 – Извлечение сухих веществ из молотого кофе при разном расходе экстрагента

Важно учитывать, что при экстрагировании из растительного сырья большое значение имеет соотношение сырье:экстрагент. Для оценки влияния такого соотношения проводились экспериментальные исследования процесса экстрагирования из кофе при различном гидромодуле. Эксперименты проводились в неподвижном слое с использованием молотого кофе ($\delta=1...2$ мм) на лабораторном стенде который состоял из микроволновой камеры с блоком регулирования мощности МВ-поля и радиопрозрачной емкости с обратным холодильником, благодаря которому сохранялся постоянный объем экстрагента и составлял 200 мл. Количество молотого кофе составляло 2, 10 и 50 г для гидромодулей 1:100, 1:20 и 1:4 соответственно.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

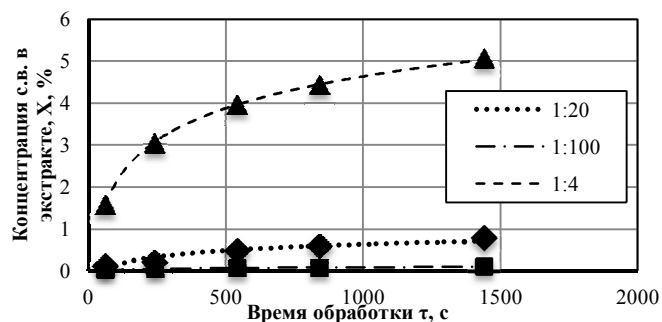


Рис. 6 – Экстрагирование из молотого кофе с разным гидромодулем

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что полнота извлечения составила 20 %, 15 % и 12 % сухих веществ, что свидетельствует о том, что при использовании большего гидромодуля обеспечивается более полное извлечение компонентов из сырья. Однако, возникает проблема разделения извлеченных компонентов и растворителя, так как полученный экстракт имеет небольшую концентрацию сухих веществ потребуются дополнительные энергетические затраты на сушку или сгущение экстракта (рис.6).

Так как процесс экстрагирования в микроволновом экстракторе предполагает противоточное движение продукта и экстрагента с целью исследования процессов в кассете с продуктом была проведена серия экспериментов с разной толщиной слоя продукта в кассете при движении экстрагента через слой продукта, так как при такой организации процесса сложно определить значение гидромодуля.

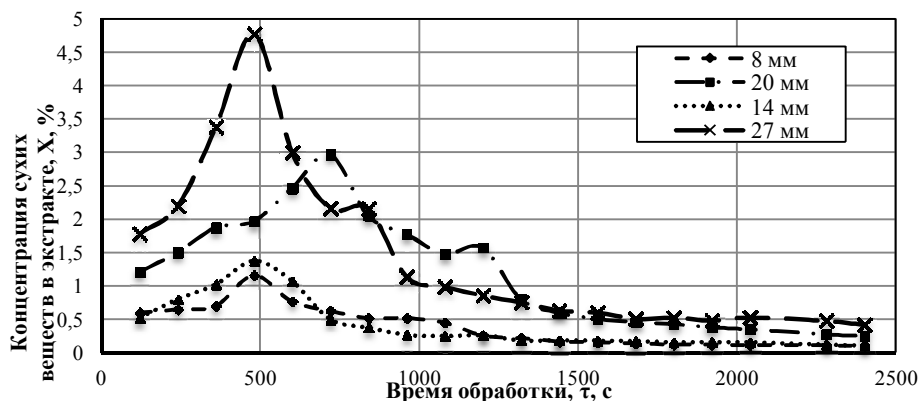


Рис. 7 – Влияние толщины слоя продукта на концентрацию сухих веществ в растворе

Наличие на графике (рис. 7) своеобразных пиков можно объяснить тем, что при тонком слое продукта в кассете увеличена площадь контакта фаз и растворитель легко попадает к продукту. В случае, когда слой продукта увеличивается – растворителю сложнее найти путь к продукту, когда растворитель попадает к новой порции продукта, то концентрация экстрактивных веществ в растворе увеличивается.

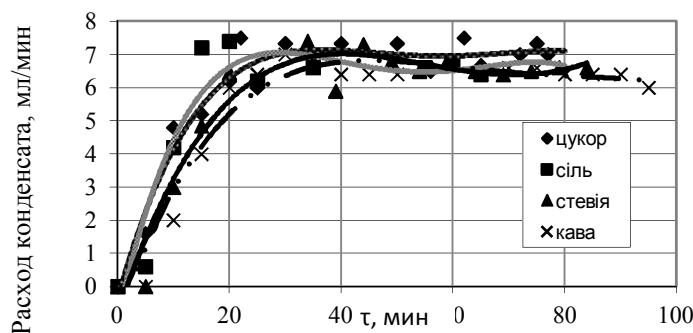


Рис. 8 – Зависимость расхода конденсата от характера раствора

Дальнейшим этапом переработки растительных экстрактов, в т.ч. и кофейного является концентрирование. При концентрировании выпариванием проблему равномерности подвода энергии также можно решить с использованием микроволновых технологий.

При микроволновом подводе энергия 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 площадь поверхности теплообмена должна возрастать на порядки. Реализуется схема подвода энергии, показавшая высокую эффективность в технологиях сушки [7, 8].

Технологии микроволновой вакуум-выпарки были применены для концентрирования экстрактов стевии *Stevia Rebaudiana* – природного сахарозаменителя, кофейного экстракта, растворов сахара и NaCl (рис. 8). Эксперименты проводились при давлении 0,009...0,011 МПа, температура процесса не превышала 50 °С.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

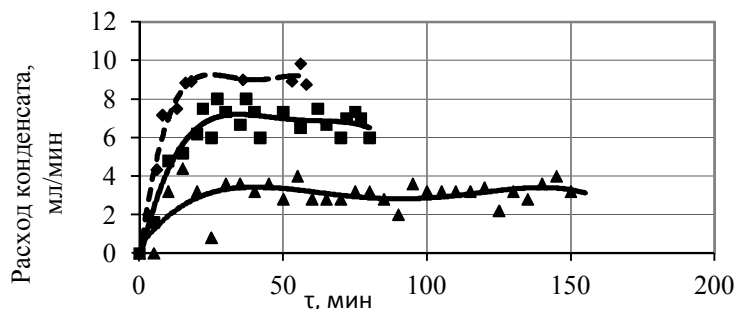


Рис. 9 – Влияние удельного энергоподвода на расход конденсата:

1 – 570 Вт/кг; 2 – 495 Вт/кг; 3 – 296 Вт/кг

ния (Рис. 9). Эксперименты проводились при давлении 0,009...0,011 МПа.

Однако при анализе термограмм процесса (рис. 10) установлено, что при мощности 570 Вт/кг температура продукта постоянно растет.

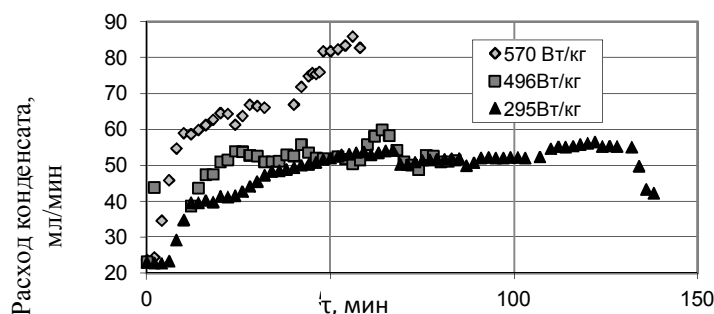


Рис. 10 – Термограммы процесса концентрирования в зависимости от удельного энергоподвода

Это указывает на то, что не вся подводимая энергия расходуется на испарение воды, соответственно такой режим энергетически неэффективен.

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. 11)

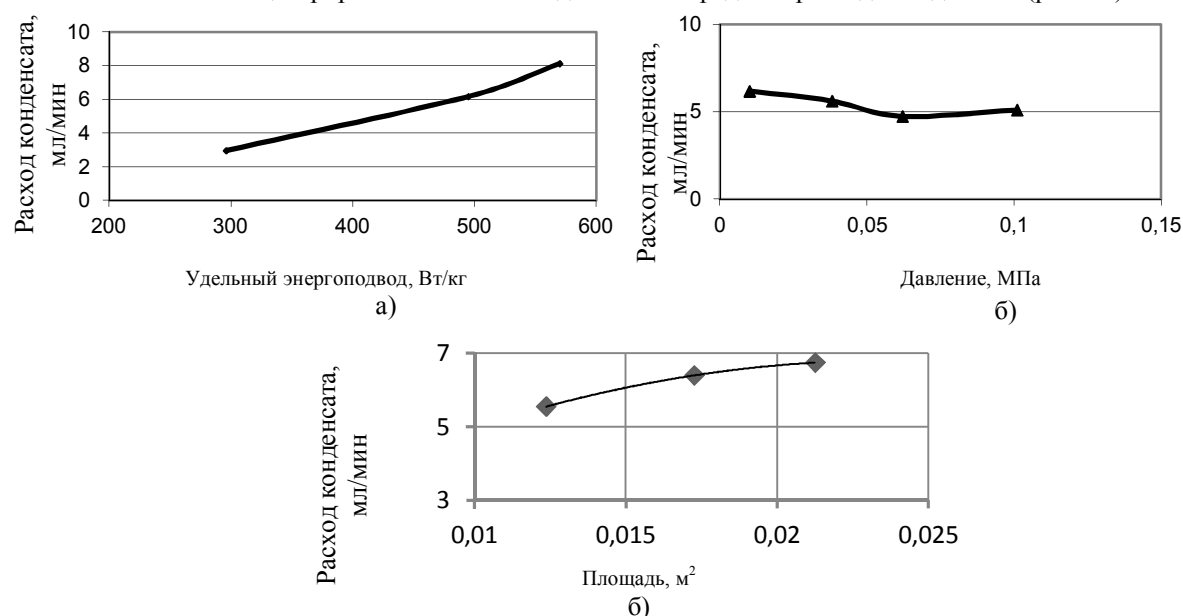


Рис. 11 – Влияние параметров процесса на расход конденсата: а) удельный энергоподвод; б) давление; в) площадь поверхности испарения

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

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.

Выводы. Применение микроволновых технологий позволяет добиться повышения выхода целевых компонентов и существенно интенсифицировать процесс экстрагирования. На интенсивность процесса влияет не только количество подведенной энергии, но и толщина слоя продукта в экстракторе, расход экстрагента. Полученные экспериментальные зависимости могут быть использованы для дальнейшей оптимизации.

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

За счет того, что по всему объему выпариваемого продукта возникают очаги парообразования, на порядки возрастает поверхность теплообмена в аппарате. Температура выпариваемого продукта зависит не только от давления в аппарате, но и от количества подведенной микроволновой энергии и может значительно превышать температуру кипения. В то же время, интенсивное испарение воды из раствора в условиях микроволнового подвода энергии происходит при общей температуре раствора ниже температуры кипения растворителя. На интенсивность испарения помимо энергоподвода и давление также оказывает влияние площадь поверхности испарения.

Литература

1. Бурдо О.Г., Рыбина О.Б. Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле [Текст]. – О. : Полиграф, 2010. – 200 с.
2. Бурдо, О.Г. Экстрагирование в системе «кофе-вода» [Текст]: моногр. / О.Г. Бурдо, Г.М. Ряшко. – О.: ТЕС, 2007. – 176 с.
3. Бурдо О.Г. Процессы переработки кофейного шлама // О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая, Т.Л. Макиевская. – Киев: Энтерпринт, 2014. – 228 с.
4. F. Mestdagh The kinetics of coffee aroma extraction // Frédéric Mestdagh, Tomas Davidek, Matthieu Chaumonteuil, Britta Folmer, Imre Blank / Food Research International 63 (2014) 271–27
5. Rohit Upadhyay Microwave-assisted extraction of chlorogenic acids from green coffee beans// Rohit Upadhyay, K. Ramalakshmi, L. Jagan Mohan Rao / Food Chemistry 130 (2012) 184–188
6. Zuorro A., Lavecchia R. Polyphenols and energy recovery from spent coffee grounds //Chem. Eng. Trans. – 2011. – Т. 25. – С. 285-290.
7. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. – Одесса: «Полиграф», 2010. – 368 с.
8. Бурдо О.Г. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В.// Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов СЭТТ-2011)». – Т.1, Москва, 2011. – С. 422 – 426.

References

1. Burdo O.G., Rybina O.B. (2010), *Processy inaktivacii mikroorganizmov v mikrovolnovom pole* [Processes of inactivation of microorganisms in microwave field], Poligraf, Odessa, Ukraine.
2. Burdo O.G., Ryashko G.M. *Ekstragirovanie v sisteme «kofe - voda»* [Extraction in “coffee-water” system], Odessa, 2007, 176 p. (In Russian)
3. Burdo O.G., Terziev S.G., Ruzhickaya N.V., Makievskaya T.L. (2014), *Processy pererabotki kofejnogo shlama* [Processes of coffee sludge treatment], Enterprint, Kiev, Ukraine.
4. Mestdagh F., Davidek T., Chaumonteuil M., Folmer B., Blank I. (2014) The kinetics of coffee aroma extraction, *Food Research International* 63, pp. 271–274.
5. Rohit Upadhyay, Ramalakshmi K., Jagan Mohan Rao L. (2012) Microwave-assisted extraction of chlorogenic acids from green coffee beans, *Food Chemistry* 130, pp. 184–188
6. Zuorro A., Lavecchia R. (2011), Polyphenols and energy recovery from spent coffee grounds, *Chem. Eng. Trans.*, Vol. 25, pp. 285-290.
7. Burdo O.G. (2010), *Evolyuciya sushil'nyh ustanovok* [Dryers evolution], Poligraf, Odessa, Ukraine.
8. 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 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye energosberegayushchie teplovye tekhnologii (sushka i termovlazhnostnaya obrabotka materialov SETT-2011)»*, Vol.1, Moscow, , pp. 422 – 426.