

Література

1. Погорелый Т. М., Мирончук В. Г. Математическое моделирование процесса рекристаллизации на основании аналитических решений нестационарных задач теплопроводности в двухмерном случае для прямоугольных областей с неоднородными (непрерывными и разрывными на одной из сторон) граничными условиями и неоднородными начальными условиями // Тезисы докладов и сообщений XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену, 10–13 сентября 2012 г. – Том 1, Часть 2. – Минск.: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2012. – С. 761–764.
2. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
3. Патанкар С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течениях в каналах. — М.: Изд-во МЭИ, 2003. — 312 с.
4. Попов В. Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 320 с.
5. Ривкин С. Л., Александров А. А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. — М.: Энергия, 1980. — 423 с.
6. Кулинченко В. Р., Мирончук В. Г. Промышленная кристаллизация сахаристых веществ: Монографія. — К.: НУПТ, 2012. — 426 с.

УДК 663.938.061.3.086

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА КОФЕ

Терзиев С.Г., канд. техн. наук, Левтринская Ю.О., аспирант,
Бурдо О.Г., д-р техн. наук, профессор
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

В работе рассмотрены современные технологии экстрагирования с использованием микроволнового поля. Показаны результаты применения комбинированных методов, которые позволяют достигнуть положительных результатов при экстрагировании компонентов. Приведены результаты отечественных и зарубежных исследований. Проведено сравнение с традиционными методами. Предложена принципиальная схема повышения эффективности использования сырьевых ресурсов и энергии при производстве экстрактов кофе.

In this work new technologies of extraction with using microwave field are revived. Results of using combining methods, which one offer to reach positive results in extraction. Results of domestic and foreign investigations are shown. The comparison with traditional methods are performed. A basic scheme for more efficient use of raw materials and energy in the production of coffee extracts are offered.

Ключевые слова: Экстрагирование, микроволновые технологии, кофе, экстракт, бародиффузия

Введение. Производство растворимого кофе включает в себя различные этапы подготовки и обработки сырья (обжарка, дробление), получения экстракта и его сушки. Извлечение ценных компонентов из кофейного сырья представляет собой сложный процесс в первую очередь из-за его капиллярной структуры, из которой сложно извлечь целевые компоненты. Наиболее массово применяется технология экстрагирования горячей водой под давлением – далее будем называть ее традиционной. При использовании высокого давления появляется возможность разогревать кофейное сырье до 180°C, что значительно интенсифицирует процесс экстрагирования. Однако традиционная методика экстрагирования имеет ряд недостатков, среди которых большая длительность процесса (7-8 часов), техническая сложность конструкций, их металлоемкость, из-за высокой температуры разрушаются легколетучие вкусоароматические компоненты (до 80% от начального содержания в обжаренных кофейных зернах). При применении традиционной методики экстрагирования выход целевых компонентов составляет от 20 до 33% от массы сырых кофейных зерен [1]. Экстракт, полученный с использованием традиционной методики экстрагирования, это энергоёмкий и дорогой продукт.

Экономические выгоды сегодня производят на основе инновационных подходов с привлечением микроволновой энергии, ультразвука и пр. Предполагается, что направленное воздействие позволит извлекать целевые вещества из микрокапилляров сырья. [1, 2]

Микроволновое экстрагирование и его основные особенности.

Кофейное зерно имеет капиллярную структуру размером от 5 нм. Размер молекул воды, в свою очередь, составляет всего 0,096 нм, что позволяет им проникать в капилляры кофейных зерен. При воздействии микроволновой энергии вода внутри капилляров испаряется и за счёт возросшего давления содержащее капилляров выбрасывается. Такое явление получило название бародиффузия. [1] .

На сегодняшний день для микроволнового экстрагирования разработаны устройства, позволяющие обрабатывать небольшое количество продукта. Изначально разработкой таких устройств занимались в научных и коммерческих лабораториях. В последнее время крупные компании также заинтересованы в развитии таких технологий. Микроволновые устройства для экстрагирования, как правило, применяются в исследовательской работе, либо для нужд фармацевтики. Их разделяют на два типа: устройства закрытого либо открытого типа. Для обработки больших объемов образцов системы закрытого типа не приспособлены. как правило они снабжены несколькими плотно закрывающимися емкостями из диэлектрически проницаемого материала. Объем таких емкостей не превышает 100 мл. Системы открытого типа позволяют обрабатывать образцы большего размера, что дает потенциальную возможность применять их в производственных нуждах. Однако на сегодняшний день аппараты для микроволнового экстрагирования, которые имеют большую производительность не производятся массово. В таблице 1 представлены характеристики некоторых микроволновых устройств для экстрагирования, которые выпускаются серийно. [3]

Таблица 1 – Обзор современных микроволновых устройств и их основные отличительные особенности

Устройство	Примечания
Корпорация CEM; MARS (открытый и закрытый тип конструкции)	Регулируемая мощность до 1600 Вт; Возможности настройки конденсаторов флегмы, использование дополнительных реагентов, дополнительное перемешивание, и т.д.; Вместимость до 40 емкостей (75 мл) при закрытой системе и одна емкость в 5 мл для открытого режима. 50–300°C в зависимости от емкости и повышение давления до 34 бар
Корпорация CEM; Discover series (открытый и закрытый тип конструкции)	Фокусировка микроволн до 300 Вт с высокой эффективностью; Режим единичной камеры с вместимостью емкости до 300 мл; Взаимодействие с автосемплером от 12 до 96 точек; 80–300°C при давлении до 21 бар; Динамический режим работы при непрерывной работе
Milestone; Ethos EX Lab; (закрытый тип конструкции)	От 1 до 100 г; мощность до 1600 Вт; Регулируемые двигатели для обычных режимов работы, высокая пропускная способность и анализ крупных проб; магнитная мешалка, испарение растворителя и восстановление после обработки; Контроль давления до 35 бар
Milestone; Ethos Digestion Lab series (открытый и закрытый тип)	Удобство для процедур разваривания; максимальное рабочее давление 100 бар; Различные конфигурации двигателей .
Anton Paar; Multiwave 3000; (закрытый тип конструкции)	Регулируемая мощность до 1400 Вт; Перемешивающее устройство и система быстрого охлаждения. Обработка до 48 образцов одновременно. Контролируемое испарение растворителя для просушки экстракта
Aurora; Biomed; Transform 800; (закрытый тип конструкции)	Обработка до 10 образцов; Максимальные режимы 250°C и 55 бар Централизованный контроль давления и температуры.
Sineo; MDS-8; (закрытый тип конструкции)	Регулируемая мощность до 1200 Вт Обработка до 10 образцов; Максимальные режимы 300°C и 80 бар.
Sineo; MDS-10; (закрытый тип конструкции)	Регулируемая мощность до 1800 Вт Обработка до 15 образцов. Максимальные режимы от 300°C до 15 бар

Каждый из типов микроволновых систем имеет свои преимущества и недостатки. Среди достоинств систем закрытого типа можно выделить то, что имеется возможность использовать различные растворители, например кислоты и щёлочи. Закрытые системы препятствуют разрушению едкими парами электроники и корпуса микроволнового экстрактора и позволяют сохранить легколетучие субстанции. Однако работа с закрытыми емкостями имеет недостатки: обработке может быть подвергнуто небольшое ко-

личество продукта (обычно не более 100 г), изготовление и работа с емкостями из стекла или политетрафторэтилена представляет дополнительные сложности, повышаются требования к безопасности систем.


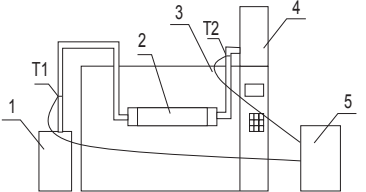
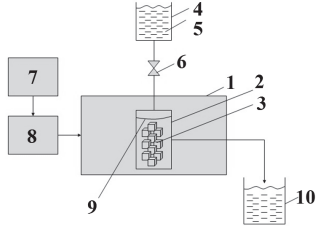
Системы, работающие при атмосферном давлении, системы открытого типа, могут быть так же эффективны, как и микроволновые системы закрытого типа, или даже эффективнее. Преимущество этих систем в их безопасности благодаря отсутствию высоких давлений, возможности обработки больших образцов и термолабильного сырья за счёт использования низких температур (ниже 100°C), кроме того есть возможность полной автоматизации работы таких аппаратов.

Новейшие методики экстрагирования. В последнее время наблюдается тенденции разработки различных режимов экстрагирования в микроволновом (МВ) поле, а также к комбинированию различных методик для достижения лучших результатов. При сочетании традиционных методик экстрагирования горячей водой с воздействиями электромагнитного и ультразвукового полей появляется возможность значительно увеличить выход целевого компонента по сравнению с этими методиками в чистом виде.

Микроволновое экстрагирование позволяет получать положительные результаты при использовании различного сырья и растворителей. С применением микроволновых аппаратов осуществляют экстрагирование из кофейного сырья, табака, какао, получают ценные биоактивные компоненты из различных растений.

В исследованиях кафедры процессов и аппаратов и энергетического менеджмента микроволновые технологии для интенсификации процессов применяются с конца 90х годов. В рамках работы над диссертациями и научно-исследовательских работ были разработаны аппараты для микроволнового экстрагирования. Достигнуты положительные результаты в экстрагировании из кофе и кофейного сырья, производстве коньяков, экстракции масел льна и амаранта [1, 2]. В таблице 2 показаны характеристики таких установок.

Таблица 2 – Характеристика экспериментальных установок для экстрагирования

Устройство аппарата	Характеристики и результаты эксперимента
	<p>Для экстрагирования масла амаранта. Растворители: спирт, гексан и нефрас, температура: 20...78°C, 20...55°C, 20...80°C; Длительность проведения эксперимента: 3...180 мин; Мощность МВ поля 127...425Вт; Выход масла амаранта доведен до 30...35%; данный экстрактор обеспечивает высокое качества масла амаранта с массовой долей сквалена 33,1-38,8 г/кг [8]</p>
 <p>1, 4 – резервуары для экстрагента; 2 – экстрактор; 3 – установка, создающая микроволновое поле; 5 – измерительный прибор; T1 и T2 – термопары</p>	<p>Для экстрагирования применялись кофейные молотые зерна с размером частиц 0,5...1 мм; 1...2 мм; 2...5 мм и целые зерна; Расход экстрагента изменялся в диапазоне от $2,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ до $7,64 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$; температура поднималась до 60°C; мощность МВ поля изменялась от 150 до 1050 Вт. Выход из твердой фазы - 38,6%. В жидкой фазе концентрации с.в. до 60%. Выход веществ в 1,4 раза выше, чем в традиционных термических режимах. [1]</p>
 <p>1 – камера с МВ генератором 8; 2 – колонка экстрактора; 3 – древесина; 4, 10 – емкости; 5 – водно-спиртовой раствор; 6 – регулятор расхода; 7 – блок управления; 9 – распределительная решетка..</p>	<p>Экстрагирование происходит в системе древесина-экстрагент; температура экстракта до 50°C; Время экстрагирования 10...12 минут; проточный аппарат позволяет производить экстрагирование из древесины дуба с расходом 1,43 мл/с; Мощность прилагаемого МВ поля от 500 Вт до 900 Вт; степень интенсификации процесса по сравнению с традиционными методами составляет 100-1000 раз. Дегустаторы отмечают высокие качественные показатели опытных образцов коньячного спирта.[8]</p>

Для экстрагирования из листьев какао в исследованиях кафедры химической инженерии Малайского университета применялся аппарат на основе бытовой микроволновой печи (Samsung MW718), оснащенный дополнительными регуляторами. Осуществлялись двухступенчатые и дискретные режимы экстрагирования. [4] Реализовывались различные режимы работы: ступенчатое изменение мощности микроволнового поля, режим с прерываниями воздействия поля, пилообразное изменение мощности микроволнового поля. Результаты, полученные в исследовании, представлены в таблице 3..

Таблица 3 – Условия режимов экстрагирования биологически активных веществ

Режим	Условия проведения эксперимента (входная мощность/ время экстрагирования)	Выход экстрагированных компонентов (мг/г)
Постоянная мощность	150 Вт/ 20 минут	9,82
Двухступенчатое изменение мощности	а) этап 1: 100 Вт / 13:46 минут; этап 2: 300 Вт / 4:14 минут;	10,50
	б) этап 1: 300 Вт / 3:20 минут; этап 2: 100 Вт / 6:40 минут;	10, 65
Режим с прерыванием МВ воздействия	а) 150 Вт / (вкл: 4 мин, выкл: 4 мин) 32 мин.	9,89
	б) 300 Вт / (вкл: 1 мин, выкл: 3 мин) 16 мин.	9,93
Пилообразное изменение мощности	а) 500 Вт / (периодичность 25 с) 30 мин.	9,79
	б) 500 Вт/ (периодичность 40 с) 15 мин.	10,00

В исследованиях тагасского научного центра совместно с колледжем пищевых наук, Фуцзяньского университета сельского и лесного хозяйства [5] использовалась комбинированная методика экстрагирования полисахаридов из *Fortunella margarita* (кумкват). Экстрагирование кислотами или щелочами не применяется по причине того, что полисахариды повреждаются при взаимодействии с ними. Поэтому, традиционно применяется метод сверхкритической флюидной экстракции, который имеет серьёзные недостатки. Это – сложность оборудования, его эксплуатации и его высокая стоимость. В сочетании с методиками микроволнового и ультразвукового экстрагирования есть возможность значительного ускорения процесса и чистоту выделяемых полисахаридов. Методика ультразвуковой микроволновой синергетической экстракции использует кавитационные колебания и высокий энергетический потенциал микроволновой энергии.

Комбинированная методика экстрагирования также применялась в исследованиях Университета Сун Ятсена (Китай). Свой метод экстрагирования они называют техника гибридного полевого дисперсного экстрагирования в системе твердое тело-жидкость-твердое тело. Целевыми компонентом при экстрагировании были хлорорганические пестициды, содержащиеся в табаке. Для экстрагирования применялся прибор UWave-1000. [6]

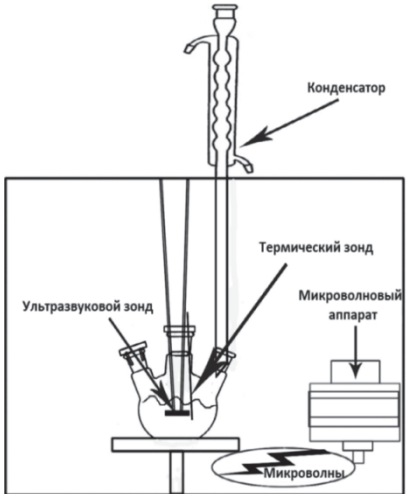
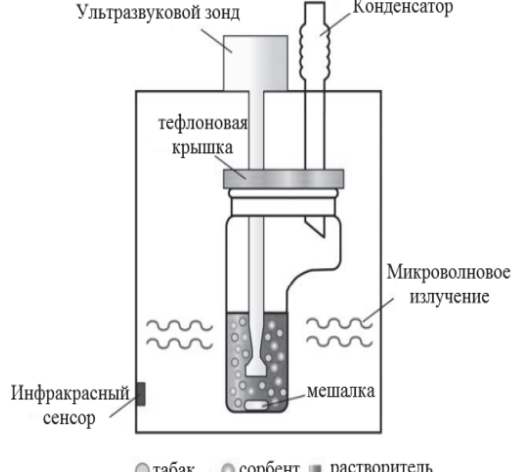
Комбинированные методики экстрагирования применяют в своих исследованиях специалисты Национального технологического университета Чин-Йи (Тайчунг, Тайвань). Техника гибридной микроволнового термального экстрагирования применяется для получения биологически активных компонентов из корня шелковицы. [7]. Результаты исследований сведены в таблицу 4.

Анализ приведенных исследований показал, что при применении микроволнового поля значительно повышается выход целевых компонентов. Способность экстрагента к их растворению снижается с повышением концентрации этих компонентов в экстракте. Потому непрерывное воздействие микроволнового поля в процессе экстрагирования менее эффективно, чем режимы, включающие в себя смену экстрагента.

Авторы сформировали гипотезу, что использование последовательных стадий работы микроволнового экстрактора, которые включают промывку истощенных зерен исходным экстрагентом, истощение целевых компонентов из капиллярных структур зерен и укрепление экстракта, должны позволить инициировать в условиях МВ – поля мощный бародиффузионный поток целевых компонентов из объема зерен. Такой режим работы должен обеспечить практически полное извлечение целевых компонентов из зерен при температурах до 100°C, что позволит предотвратить разрушение ценных компонентов, повысить качество продукта, снизить энергоёмкость аппарата, повысить его производительность и обеспечить

непрерывность процесса. На рисунке 1 представлены схема ведения процесса и основные зоны микроволнового экстрактора.

Таблица 4 – Комбинированные методики экстрагирования и результаты экспериментов

Устройство аппарата	Характеристики эксперимента	Результаты
	<p>ХН-300В с ультразвуковым устройством (максимальная мощность около 1500 Вт и частота близко 25МГц). МВ мощность 1000 Вт при частоте 2450 МГц). Для экстрагирования использовали 5 г <i>F. Margarita</i> измельченного до порошкового состояния, разведенного в воде. (в соотношении 30-90 мл/г). Экстрагирование проводилось в течение 30-120 с при воздействии ультразвукового (50-200 Вт) и микроволнового (25-175 Вт) полей. Экстракт был отфильтрован с использованием центрифуги при температуре 25°C и при скорости вращения 5000 об. мин. в течение 10 минут.</p>	<p>выход полисахаридов может увеличен до 405,52%, 128,18%, 76,62% по сравнению с экстрагированием горячей водой, ультразвуковым экстрагированием и микроволновым экстрагированием соответственно</p>
	<p>Аппарат для экстрагирования UWave-1000 представляет собой простую закрытую систему, выполненную из стекла. Микроволновое излучение с максимальной мощностью 1000 Вт при частоте 2450 МГц есть возможность динамического регулирования температуры изменением мощности, ультразвуковое поле с частотой от 26 до 28 КГц и регулируемой мощностью от 0 до 800 Вт. Температуру измеряли с помощью инфракрасного сенсора, расположенного на внутренней стенке аппарата</p>	<p>Возможность извлекать вещества, которые не удавалось получить при применении методики ультразвукового и традиционного экстрагирования. Общая эффективность получения веществ в сравнении с другими методиками выход компонентов повышен.</p>
<p>Аппарат состоит из: МВ модуля, который включает магнетрон с максимальной мощностью 800 Вт и частотой 2450 МГц, корпус с защитой и экранированием и стеклянные прозрачные для микроволн емкости; разделяющего модуля, который состоит из внутреннего движущегося ротора и зафиксированного внешнего статора; температурного модуля, который содержит трубку обратного потока, циркуляционный насос и датчик температуры.</p>	<p>Микроволновая мощность: 193 Вт, 139 Вт, 46 Вт; Скорость гомогенизации: 0 об.мин., 4000 об.мин, 5000 об.мин; Концентрация этилового спирта в растворителе: 40%, 60%, 80%; Время экстрагирования: 5 мин, 10 мин, 15мин</p>	<p>Определены параметры, дающие лучшие результаты по выходу флавоноидов. По сравнению с простым МВ экстрагированием выход увеличен на 36,24%, 28,85% и 21,11%</p>

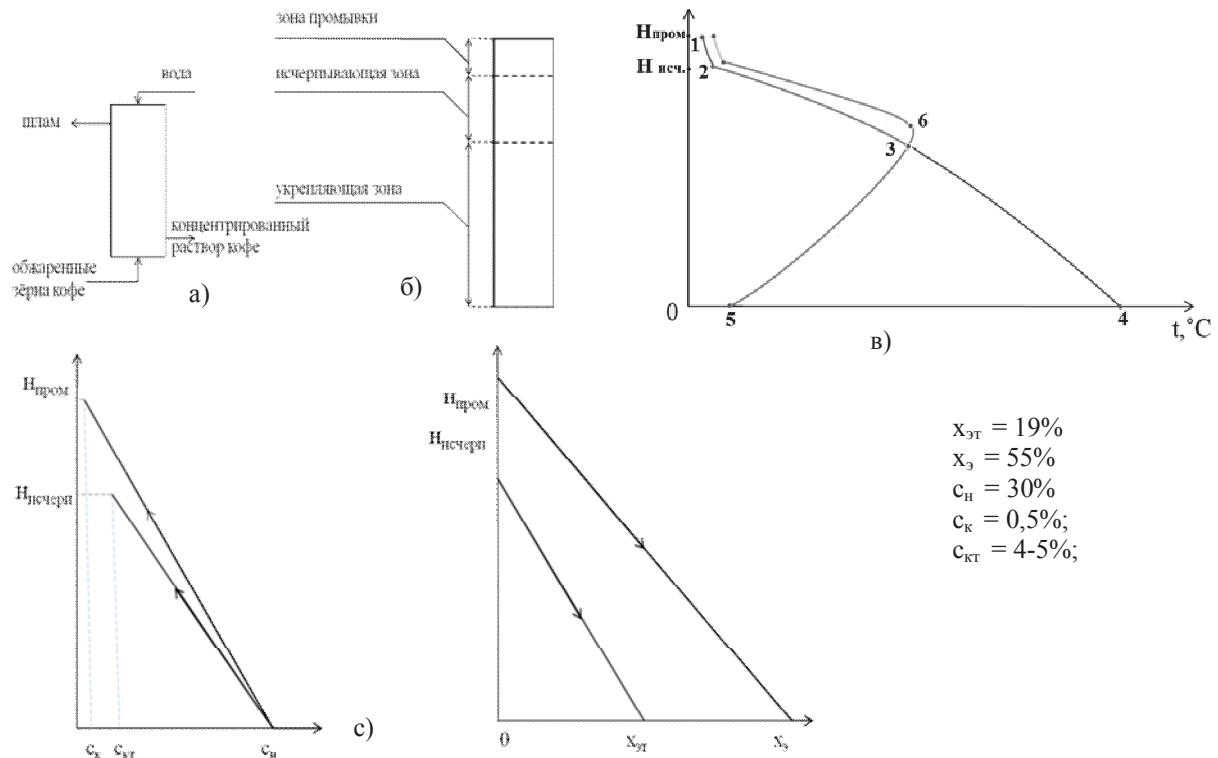


Рис. 2 — а) схема ведения процесса и зоны экстрактора; б) распределение температур по высоте экстрактора: 1-2 – нагрев экстрагента от зерен; 2-3-4 – нагрев экстракта от СВ поля; 5-6 – нагрев зерен экстрагентом и СВ полем; 6-7 – охлаждение зерен водой; 7-8 – охлаждение экстракта водой; в) сравнение традиционного и микроволнового экстрагирования: $x_{\text{эт}}$ – концентрация э.в. на выходе из экстрактора при традиционном экстрагировании, $x_{\text{э}}$ – ожидаемая концентрация э.в. при предлагаемом методе, $c_{\text{кт}}$ – концентрация э.в. в истощенных зернах при традиционном экстрагировании, $c_{\text{к}}$ – ожидаемая концентрация э.в. в зернах при предлагаемом методе.

В микроволновый экстрактор сверху подается растворитель (вода), снизу в экстрактор загружаются кассеты с продуктом, осуществляется противоточное движение потоков. Направление движения показано на (рис.1, а). Экстракт последовательно проходит зону промывки, исчерпывающую и зону насыщения микроволнового аппарата (рис.1, б). В аппарат экстрагент поступает с температурой около 20°C , затем от контакта с кофейными зёрнами экстрагент немного нагревается. В зоне промывки микроволновое поле не действует и экстрагент смывает экстракт с поверхности кофейных зёрен, которые прошли исчерпывающую зону и зону насыщения. В зоне насыщения на систему кофе-вода действует микроволновое поле и происходит экстрагирование основного количества водорастворимых веществ. При этом температура повышается до $60-90^\circ\text{C}$. В укрепляющей зоне, происходит дополнительное экстрагирование и увеличение концентрации кофейного экстракта. Относительное распределение температур по высоте экстрактора указано на (рис.1. в). Предполагается, что такой метод экстрагирования позволит получать экстракт с содержанием сухих веществ до 55% , в то время, как традиционные методики экстрагирования позволяют получать концентрацию сухих веществ в экстракте в 19% . Что касается эффективности использования сырья – ожидается её увеличение на 10% по сравнению с традиционными методиками экстрагирования. Сравнение эффективности экстрагирования приведено на (рис.1, с)

Выводы. Проведенный анализ современных техник экстрагирования показывает результативность методик с использованием микроволновой энергии. В зависимости от особенностей сырья для экстрагирования и того, какие компоненты необходимо получить следует подбирать режимы работы аппаратов. Правильно подобранный режим экстрагирования может в значительной мере улучшить результаты экстрагирования. Большую эффективность выхода целевых компонентов можно получить с использованием комбинированных техник экстрагирования. Сочетание микроволнового экстрагирования с ультразвуковым и термальным воздействием дает положительные результаты в ряде исследований. Отсутствие высокого давления позволяет оснащать устройства для микроволнового экстрагирования устройствами для перемешивания, что позволяет интенсифицировать процесс. Исследованные методики подтверждают

целесообразность использования микроволновых технологий в экстрагировании. Разработана рабочая гипотеза, согласно которой последовательное прохождение кофейного экстракта через исчерпывающую зону и зону насыщения позволят получить экстракт высокого качества при низких энергозатратах.

Литература

1. Бурдо О.Г., Ряшко Г.М. Экстрагирование в системе "кофе - вода". – Одесса, 2007. – 176 с.
2. Процессы переработки кофейного шлама/ Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Ружицкая Н.В., Макиевская Т.Л. – Киев: ЭнтерПринт, 2014. – 228с.
3. F. Chemat and G. Cravotto (eds.), *Microwav-assisted Extraction for Bioactive Compounds: Theory and Practice*, Food Engineering Series 4, © Springer Science&Business Media New York 2013 Chapter 2
4. *Fundamentals of Microwave Extraction*, Priscilla C. Veggi , Julian Martinez , and M. Angela A. Meireles
5. A generalized energy-based kinetic model for microwave-assisted extraction of bioactive compounds from plants ; Chung-Hung Chan, Jian-Jiun Lima, Rozita Yusoff, Gek-Cheng Ngoh; *Separation and Purification Technology* 143(0): 152-160.
6. Ultrasonic–microwave synergistic extraction (UMSE) and molecular weight distribution of polysaccharides from *Fortunella margarita* (Lour.) Swingle; Hongliang Zeng, Yi Zhang, Shan Lin, Yeye Jian, Song Miao, Baodong Zheng, *Separation and Purification Technology* 144 (2015) 97–106
7. Hybrid Field-Assisted Solid Liquid Solid Dispersive Extraction for
8. the Determination of Organochlorine Pesticides in Tobacco with Gas
9. Chromatography; Ting Zhou, Xiaohua Xiao, and Gongke Li; *Analytical Chemistry*. 2012, 84, 420–427
10. Wang, C.-C., et al.: Application of Hybrid Microwave Thermal Extraction Techniques For Mulberry Root Bark, *THERMAL SCIENCE*, Year 2013, Vol. 17, No. 5, pp. 1311-1315
11. Пищевые наноэнерготехнологии: научное пособие/ О.Г. Бурдо. – Херсон: Гринь Д.С., 2013. – 294 с.