

Разработка энергоэффективных и экологически безопасных технологий производства кофепродуктов

О. Г. Бурдо, И. В. Безбах, А. В. Зыков, С. Г. Терзиев, А. В. Гаврилов,
И. В. Сиротюк, И. К. Мазуренко, Юнбо Ли

На основі енергетичного й екологічного аудиту проведено аналіз матеріальних потоків, конверсії енергії, викидів в атмосферу й літосферу при виробництві розчинної кави.

Для підвищення енергоефективності, зниження екологічного навантаження розроблені інноваційні технологічні схеми й устаткування по переробці відходів і виробництву нових кавових продуктів.

Проведено експериментальне моделювання: кінетики мікрохвильового екстрагування водорозчинних речовин і масла з кавового шламу; гідравліки плинного екстрагента через касети мікрохвильового екстрактора. Експериментальні дані узагальнені у вигляді критеріального рівняння.

У результаті експериментального моделювання кінетики екстрагування встановлено, що тривалість процесу в мікрохвильовому полі приблизно в 20 разів менше, ніж у термостаті. Дія мікрохвильового поля впливає на швидкість екстрагування більшою мірою, чим температура процесу. Підвищення потужності мікрохвильової енергії підвищує вихід екстрактивних речовин з кавового шламу більш ніж у два рази.

Визначено технічні характеристики мікрохвильового екстрактора масла. Випробування зразка екстрактора проводилися при питомій потужності 180...240 Вт/кг у режимі кипіння екстрагенту. У якості екстрагенту використовувався етанол (концентрація 93...96 %). У результаті випробувань отримане якісне кавове масло, що характеризується вираженням ароматом і смаком кави й інтенсивним темно-коричневим фарбуванням.

Розроблено технологічну схему передекстрагування кави зі шламу. Додатковий витяг зі шламу кави водорозчинних екстрактивних речовин, підвищує вихід екстракту на 10...12 %. Істотно знижено температурний режим екстрагування, зменшені тривалість і енергоємність процесу.

Розроблено інноваційну технологічну схему виробництва рідкого концентрату кави – основи для напоїв на базі кави, готових до безпосереднього вживання. Концентрація сухих речовин становить 50...65 %.

Ключові слова: харчові концентрати, масло кави, кавовий шлам, мікрохвильове екстрагування, енергетичний моніторинг

1. Введение

Для пищевых концентратов (ПК) характерно: быстрота приготовления, продолжительные сроки хранения и высокое качество. Именно эти качества ПК привлекают интерес широкого круга потребителей, и сейчас большинство жи-

телей планеты все чаще обращаются к продуктам пищевого концентрата отрасли [1]. Быстро расширяется ассортимент ПК и их рынки. Это первые и вторые блюда, десерты и напитки [2]. Самым востребованным продуктом ПК в мире стал порошок растворимого кофе. Численность работников кофейной индустрии на планете достигло 25 млн. человек.

В последние годы в мире стремительно растут продажи растворимого кофе [3]. Кофе является вторым по величине предметом торговли после нефти и вторым по популярности напитком после воды. Большинство производителей кофейных продуктов сталкиваются высокими ценами на импортное сырье и энергоносители. Ключевые операции производства – экстрагирование и сушка отличаются энергоемкостью и экологическими проблемами [4, 5]. Поскольку влиять на стоимость сырья производители кофейных продуктов не могут, то есть два конкурентных направления. Первое – это инновационные технологии, направленные на совершенствование процессов сушки и экстрагирования. Второе – инновационные технологии глубокой переработки сырья, перевод производства на принципы экоиндустрии.

Актуальной задачей для производителей кофейных продуктов является не только утилизация отходов производства, но и разработка новых технологических решений, которые позволили бы снизить энергозатраты, уменьшить нагрузку на окружающую среду, увеличить ассортимент продукции.

Новыми эффективными технологиями экстрагирования и переработки сырья считаются объемные безградиентные принципы подвода энергии к элементам растительного сырья. Интенсификация процессов переноса в таких системах достигается в несколько раз и, иногда, и на порядки.

Именно принципы адресной доставки энергии при переработке пищевого сырья дают возможность разработать инновационное энергоэффективное оборудование. Применение такого оборудования позволит создать принципиально новые технологические линии по переработке отходов и производству кофейных продуктов.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Кофейная отрасль производит огромное количество отходов в виде отработанного кофейного шлама, который является одним из основных побочных продуктов. Переработка таких отходов в топливо и продукты с добавленной стоимостью является многообещающим способом решения проблем многих стран, сталкивающихся с ежедневными проблемами и большими затратами на удаление отходов.

Обсуждаются различные возможности для использования кофейного шлама, а именно производство биотоплива [6], биодизеля [7], биогаза [8], биоэтанола, топливных пеллет [9, 10] и биомасла [11]. Из кофейного шлама предлагается производить продукты с добавленной стоимостью, такие как биоактивные соединения, адсорбенты, полимеры, нанокompозиты [12] и компост [13].

Но в работах [6–13] остаются нерешенными вопросы, связанные с системным анализом теплотехнологий производства растворимого кофе, пищевых концентратов. Причиной этого может быть то, что исследователи больше вни-

мания обращают на проблемы утилизации отходов, хотя в самой технологии производства растворимого кофе существуют огромные резервы для повышения энергоэффективности и снижения нагрузки на окружающую среду. Целесообразным является проведение энергетического и экологического аудита теплотехнологий производства кофе, выявление резервов, разработка и научное обоснование новых технологических схем.

Предлагается различное оборудование и технологии для извлечения ценных веществ из кофе и кофейного шлама. В основном разрабатывается оборудование на базе микроволновых (МВ) экстракторов. Предлагается применять микроволновую экстракцию для извлечения: полисахаридов из отработанного кофейного шлама [14], масла зеленого кофе [15], природных антиоксидантов из кофейного шлама с применением этанола в качестве растворителя [16], ценных соединений полифенолов из шлама кофе [17].

В работе [15] приведены результаты исследований МВ экстракции масла из зеленых кофейных зерен. Показано что применение МВ экстракции позволило провести процесс в течение 10 минут при 45 °С по сравнению с четырех-часовой экстракцией в аппарате Сокслета. Полученные экстракты показывают высокую антиоксидантную активность. Но остались нерешенными вопросы, связанные с экстракцией масла из кофейного шлама. Возможно, это связано с тем, что содержание масла в молотом кофе больше чем в отходах. Но как показывают исследования, в шламе содержится 7...12 % кофейного масла. Остаточные вещества в кофейном шламе имеют полноценный химический состав и не уступают по качеству содержащимся в кофе. Шлам является ценным дополнительным источником для получения кофейного масла. Получение масла кофе из шлама, а не из молотого кофе, значительно снизит себестоимость продукта. Целесообразным является проведение исследования кинетики экстрагирования водорастворимых веществ и масла из кофейного шлама.

В работах [16, 17] приведены результаты исследований МВ экстракции отработанного фильтрованного кофе, который является отходами в ресторанах, кафе, домашних условиях. В качестве экстрагента использован этанол 20% концентрации. В результате получен экстракт полифенолов с высокой антиоксидантной активностью. Но остались нерешенными вопросы, связанные с использованием отходов технологических линий промышленного уровня. Не рассмотрена конструкция промышленной установки. Целесообразным является проведение исследований для условий промышленного масштаба.

Рассматриваются варианты жидкостной экстракции под давлением для масла из зеленого кофейного зерна [18], при низкой температуре (50 °С); МВ экстракции масла из отработанного кофейного шлама с использованием растворителя CO₂ и этанола [19]. Показано, что применение указанных методов обеспечивает высокий выход экстрактивных веществ. Сокращается длительность процесса, используется меньшее количество органического растворителя. В работе [14] приведены результаты исследований МВ экстракции полисахаридов из отработанного кофейного шлама. Эксперименты проводились в условиях повышенной температуры (140...200 °С) и давления (4 МПа). Но применение высоких давлений, особенно сверхкритической экстракции CO₂, приводит к

дополнительным энергозатратам. Для указанных технологий присуща сложная аппаратная реализация процесса. Целесообразным является разработка конструкции универсального энергоэффективного МВ экстрактора, который обеспечит режимы работы при температурах до 100 °С и атмосферном давлении.

В последнее время интенсивно развиваются исследования процессов сушки пищевого сырья в инфракрасном, МВ поле [20–22]. Показано, что применение указанных методов обеспечивает интенсификацию процессов переноса в несколько раз а, иногда, и на порядки. Но остались нерешенными вопросы, связанные с использованием таких технологий в области производства растворимого кофе, пищевых концентратов. Возможно, это связано с тем, что указанное оборудование сложно масштабировать для промышленных мощностей.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка энергоэффективных и экологически безопасных технологий производства кофепродуктов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести энергетический и экологический аудит материальных потоков, конверсии энергии, выбросов в атмосферу и литосферу при производстве растворимого кофе;
- провести экспериментальное моделирование: процесса микроволнового экстрагирования водорастворимых веществ и масла из кофейного шлама, гидравлики течения экстрагента через кассеты МВ экстрактора, обобщить данные в виде критериального уравнения;
- разработать технологическую схему предэкстрагирования кофе из шлама, определить характеристики полупромышленной установки – МВ экстрактора;
- разработать технологическую схему для переработки кофейного шлама, определить технические характеристики микроволнового экстрактора масла;
- разработать инновационную технологическую схему производства жидкого концентрата кофе.

4. Методы проведения энергетического, экологического аудита и исследований процесса микроволнового экстрагирования

Энергетический аудит технологической линии производства растворимого кофе проводился по разработанной расчетно-экспериментальной методике определения тепловых потерь [23] и методами тепловых балансов. Экологический аудит основывался на исследовании материальных потоков сырья, полуфабрикатов и готового продукта.

Основной объем экспериментальных исследований посвящен процессам экстрагирования. Опыты проводились на 4 стендах. Подробное описание стендов приведено в [4,5]. Стенд № 1 состоял из суховоздушного термостата и емкости с измельченными кофейными зернами и экстрагентом. Здесь имитировались режимы экстрагирования традиционных технологий. Именно с результатами, полученными на этом стенде, сравнивались данные стендов 2–5. Основным элементом стенда № 2 являлась МВ-камера. Обеспечивалось регулирование и измерение мощности излучения, определение температуры и concentra-

ции. На стендах № 2 и № 3 проведены опыты по извлечению водорастворимых веществ из кофейного шлама.

Программа опытов на стенде № 2 предусматривала последовательные операции: слив экстракта и добавление к шламу чистого экстрагента (воды). Осуществлялось 11 заливов кофейного шлама водой при температуре 80 °С и гидромодуле 1:4. Изучался массоперенос из частиц шлама кофе фракции размером 0,5...2 мм, полученной после просеивания, при влиянии электрофизического воздействия на общее количество экстрактивных веществ. Определялась степень извлечения экстрактивных веществ по насыщению раствора [4, 5].

На стенде № 3 исследовалось влияние основных параметров на процесс МВ экстракции из кофейного шлама. Удельная мощность устанавливалась равной 270, 450, 630, 900 Вт/кг. Высота слоя шлама равнялась 8, 14, 20 и 27 мм. Объемный расход экстрагента изменялся – $1 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$ и $3 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Гидромодуль составлял 1:3 и 1:10. Температура контролировалась пирометром излучения и электронным термометром DAN-1000.

На стенде № 4 проводились опыты по кинетике экстрагирования масла кофе в условиях МВ-поля. Опыты по экстрагированию масел из кофейного шлама проводились в широком диапазоне температур, объемов и разными по химической природе и взаимодействию с микроволновым полем экстрагентами.

5. Результаты проведения энергетического, экологического аудита и исследований процесса микроволнового экстрагирования

5.1. Результаты проведения энергетического и экологического аудита при производстве растворимого кофе

Рассмотрим подробнее теплотехнологию растворимого кофе (рис. 1). От обжарочной печи (ОА) теряется теплота (Q_0), от экстракторов – ($Q_{\text{Э}}$). Экстракт (Э) обезвоживается, при этом в атмосферу выбрасывается отработавший теплоноситель (ОТ), который содержит пыль растворимого кофе. Есть потери теплоты и с потоком готового продукта (РК). Из экстрактора выгружается шлам (Ш), объем которого около 70 % от исходного сырья.

Анализ материальных затрат на ресурсы в технологиях растворимого кофе показывает, что основные расходы связаны с оплатой за природный газ (66...70 %). Затраты на электроэнергию составляют 23...24 %, а на воду – 7...10 %.

Основные проблемы производства растворимого кофе: значительная энергоемкость оборудования и длительность технологического процесса (7...8 ч) и использование высокого давления в экстракторах (0,3...1,5 МПа).

В процессе производства на стадиях измельчения, хранения, экстрагирования и сушки имеют место потери ценных легколетучих вкусовых и ароматических веществ. Эти потери составляют более 80 % от их начального количества в обжаренных зернах. С выбросами теплоносителя за год с одной сушильной установки теряется: 8200 ГДж тепловой энергии и 4560 кг готового продукта (порошка кофе).

Экологический мониторинг производства растворимого кофе показал, что предприятие оказывает серьезную нагрузку на окружающую среду. Загрязнителями атмосферы являются составляющие потока отработавшего теплоносителя:

влаги и пыль кофе, а также, теплота. Источниками загрязнений литосферы является кофейный шлам. Несмотря на серьезные экологические проблемы, которые связаны со спецификой кофейного шлама, и на потери с ним ценных веществ (табл. 1), практических примеров его полной переработки нет.

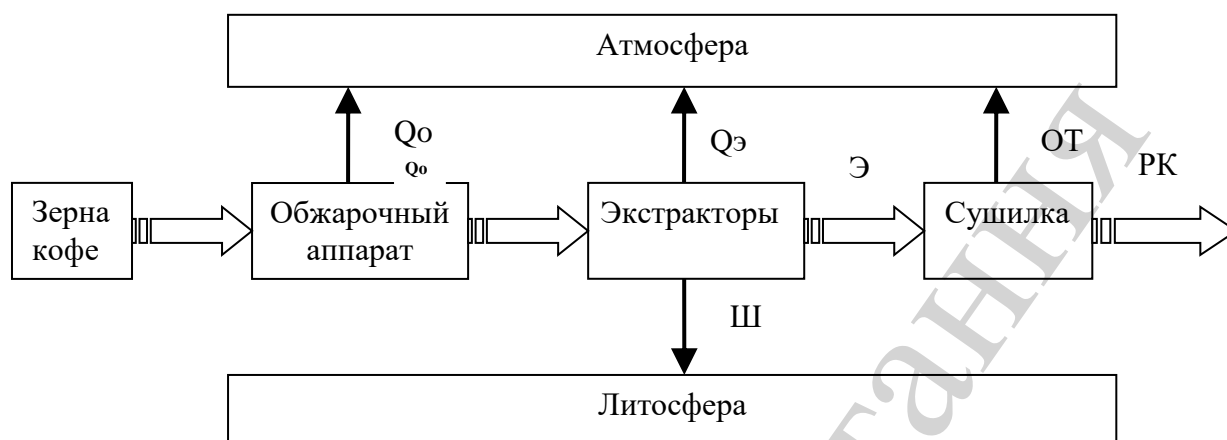


Рис. 1. Потоки сырья, энергии и отходов при производстве растворимого кофе:

Q_o – потери теплоты от обжарочного аппарата, $Q_э$ – потери теплоты от экстракторов, РК – потери теплоты с потоком готового продукта, Э – экстракт, ОТ – отработавший теплоноситель, Ш – шлам

Таблица 1
Структура кофейного шлама

№	Компонент	Содержание, %	Пути утилизации
1	Водорастворимые вещества	4	Доэкстрагирование
2	Кофейное масло	7...12	Экстрагирование
3	Вкусоароматические вещества	3...5	Дистилляция
4	Белки	5...7	Активация
5	Целлюлоза и лигнин	60...75	Брикетиrowание

Предлагаются системы экологической защиты для улавливания из аэрозольных выбросов сушилки теплоты, влаги и пыли пищевого продукта и глубокой переработки шлама. При утилизации шлама экстрагированием выделяется масло кофе. Активация обезжиренного шлама позволяет получить связующий компонент и изготавливать на его основе строительные материалы. Последовательная обработка шлама в сушилке, пресс-грануляторе и брикетирование даст возможность производства агропеллет.

На распылительной сушилке кофе (РС) целесообразно установить систему комплексной утилизации теплоты и пыли пищевого продукта (ТМУ). Электромагнитные генераторы адресной доставки энергии предлагается использовать в экстракторах жидких концентратов кофе (Э2) и кофейного масла (Эм). Решать проблемы энергообеспечения предприятия можно за счет переработки шлама (ЛПШ) на агропеллеты (Дп), которые могут полностью заменить природный газ в системе отопления и в РС. Генераторы инфракрасного диапазона (ИКГ) представ-

ляют интерес в ленточной сушилке (Л), как дополнительные или самостоятельные регистры. Эффективны генераторы микроволнового диапазона (МВ). Система таких теплотехнологий адресной доставки энергии к элементам пищевого сырья позволит перевести производство на рельсы экоиндустрии (рис. 2).

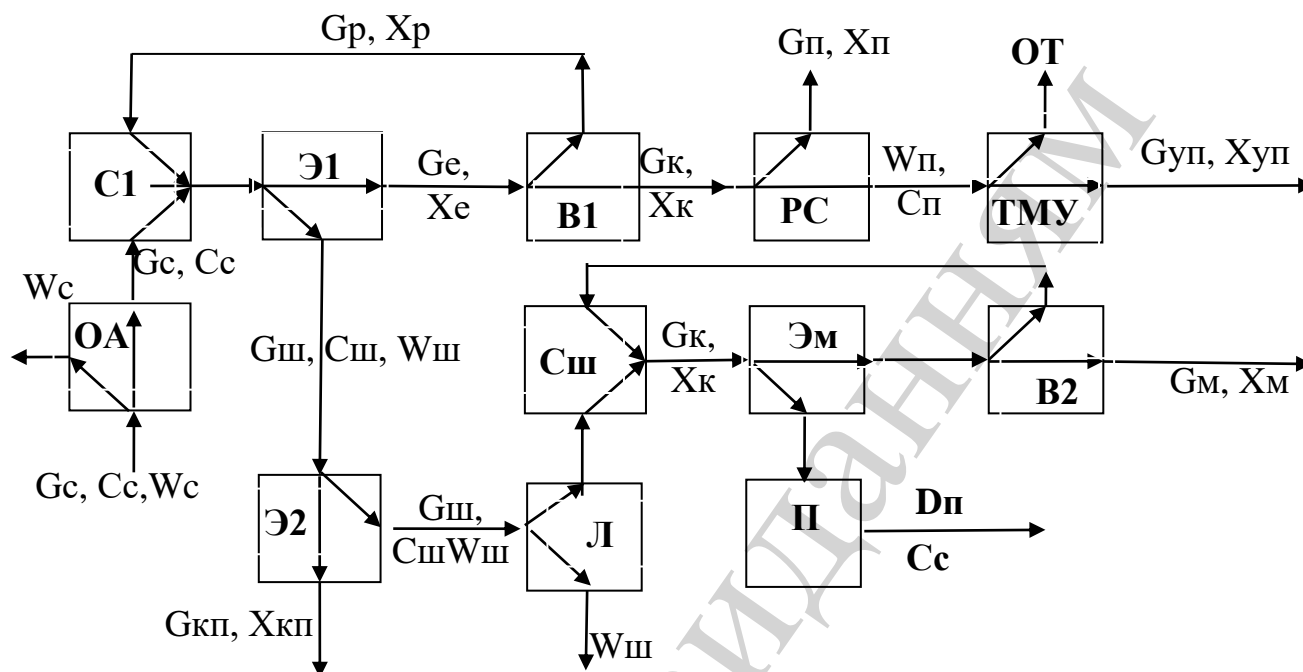


Рис. 2. Схема системы инновационных теплотехнологий производства кофе: ОА – обжарочный аппарат, С1 – смеситель, Э1 – экстрактор, В1 – выпарной аппарат, РС – распылительная сушилка, ТМУ – тепломассоутилитатор, Э2 – экстрактор, Л – ленточная сушилка, Сш – смеситель, Эм – экстрактор масла, В2 – выпарной аппарат, П – пресс-гранулятор, ОТ – отработавший теплоноситель, С, Х – концентрации в твердой фазе и в растворе; W – влагосодержание; t – температура; индексы: с – твердая фаза; е – экстракт; м – масло

Характеристика технологических потоков приведена в табл. 2.

Разработанная конструкция тепломассоутилизатора (ТМУ) внедрена в линию сушки растворимого кофе на Одесском комбинате пищевых концентратов (Украина) [23]. Система утилизации снижает тепловые потери до 75 % и извлекает из газовых выбросов при сушке до 99 % пыли пищевого продукта – порошка кофе.

Серьезные резервы снижения расхода энергетических ресурсов в линии производства растворимого кофе заключаются в организационных мероприятиях. Только соблюдение нормативных режимов работы оборудования даст сокращение расхода энергетических ресурсов от 18 % (в котельной) до 40 % (на распылительной сушилке). Вторым этапом совершенствования теплотехнологий считаются проекты по утилизации тепловых выбросов энергоемкого оборудования, монтажу тепловой изоляции. Третьим этапом модернизации являются проекты внедрения инновационных проектов адресной доставки энергии в технологиях сушки и экстрагирования.

Таблица 2

Структура технологических и энергетических потоков

№	аппарат	процесс	структура потока	
			на входе	на выходе
1	Обжарочный аппарат (ОА)	обезвоживание и обжарка	сырые зерна кофе $C_c=20...33 \%$; $W_c=10...15 \%$	зерна кофе $C_c=20...33 \%$ $W_c=5...7 \%$
2	Смеситель (С1)	смешивание	зерна кофе $C_c=20...33 \%$ экстрагент – вода, $t=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	зерна кофе $C_c=20...33 \%$ экстрагент – вода, $t=160 \text{ }^{\circ}\text{C}$
3	Экстрактор (Э1)	экстрагирование	зерна кофе $C_c=20...33 \%$ экстрагент – вода	экстракт, $X_e=19 \%$, шлам, $C_c=4...5 \%$
4	выпарной аппарат (В1)	концентрирование	экстракт, $X_e=19 \%$	экстракт, $X_e=28 \%$
5	Сушилка (РС)	распылительная сушка	экстракт, $X_e=28 \%$, теплоноситель, $t=230 \text{ }^{\circ}\text{C}$	порошок, $C_c=95 \%$, теплоноситель, $t=140 \text{ }^{\circ}\text{C}$
6	Тепломассо-утилизатор (ТМУ)	нагрев воздуха, конденсация, растворение пыли	газ, $t=140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в 1 м^3 $0,055 \text{ г}$ пыли кофе	раствор, $X_e=8 \%$, воздух, $t=60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
7	Экстрактор (Э2)	дополнительное экстрагирование	шлам, $C_c=4...5 \%$ вода	шлам, $C_c=0,5 \%$ экстракт, $X_e=4...5 \%$
8	Ленточная сушилка (Л)	сушка шлама	шлам, $C_m=12 \%$ влага, $w=80...82 \%$	шлам, $C_m=12 \%$ влага, $w=9 \%$
9	Смеситель (Сш)	смешивание	шлам, $C_m=12 \%$ экстрагент	шлам, $C_m=12 \%$ экстрагент
10	Экстрактор масла (Эм)	экстрагирование масла кофе	шлам, $C_m=12 \%$	экстракт масла
11	Выпарной аппарат (В2)	отгонка растворителя	экстракт масла	экстрагент, масло кофе
12	Пресс-гранулятор (П)	брикетирование	обезжиренный, сухой шлам	пеллеты

5. 2. Результаты исследований процесса микроволнового экстрагирования

Последовательно определялись значения предельной концентрации экстрактивных веществ, изучались гидравлика процесса, влияние режимных параметров и скорости потока экстрагента на интенсивность массообменных процессов экстрагирования.

На стенде № 2 определялась максимальная концентрация экстрактивных веществ в кофейном шламе. На рис. 3 представлено распределение количества извлеченных растворимых веществ по заливам.

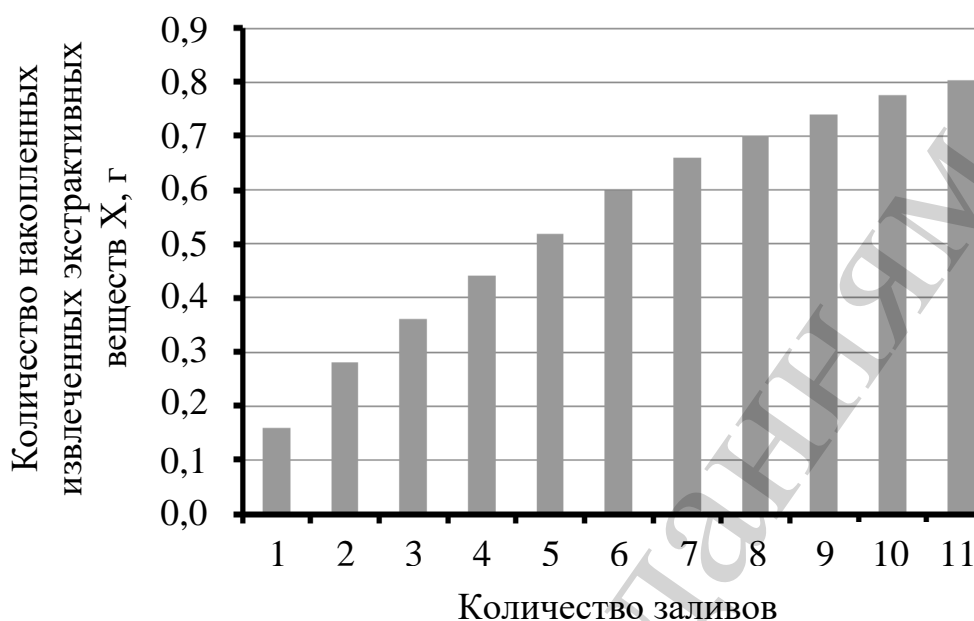


Рис. 3. Предельные концентрации экстрактивных веществ в кофейном шламе

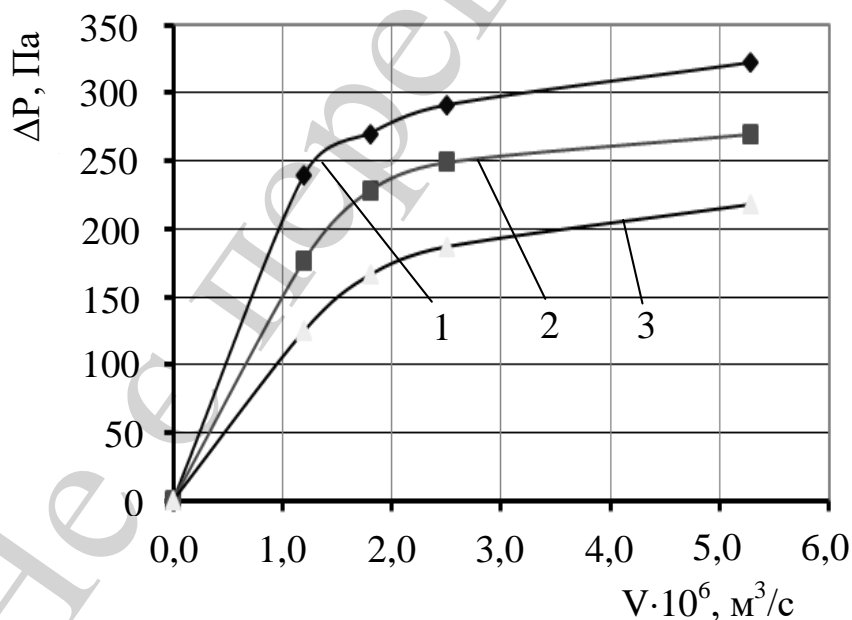


Рис. 4. Гидравлика кассет. Высота слоя продукта в кассете: 1 – $\delta = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; 2 – $\delta = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; 3 – $\delta = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

Всего из 100 г шлама кофе при электромагнитном воздействии было извлечено 0,8 г экстрактивных веществ. При первом заливе было извлечено 0,16 % общего количества экстрактивных веществ из образцов, подвергающих-

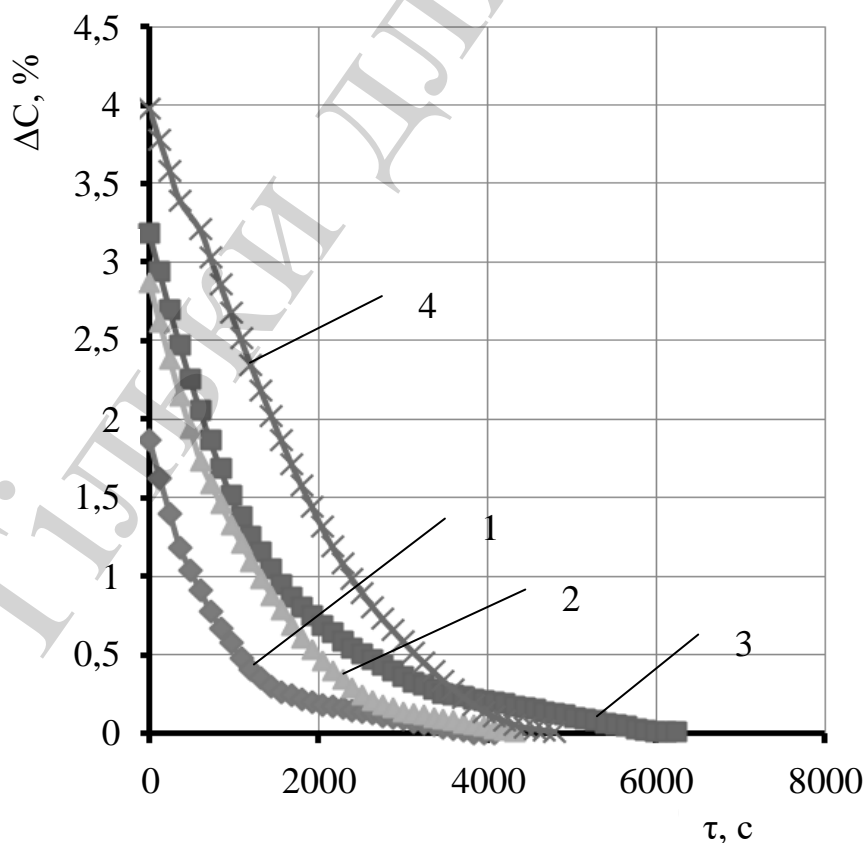
ся электромагнитному воздействию. После второго залива было извлечено 0,12 %, после третьего – 0,08 %, а также данные по последующим заливам соответственно: 4 – 0,08 %; 5 – 0,08 %; 6 – 0,08 %; 7 – 0,06 %; 8 – 0,04 %; 9 – 0,04 %; 10 – 0,036 %; 11 – 0,028 % (рис. 3).

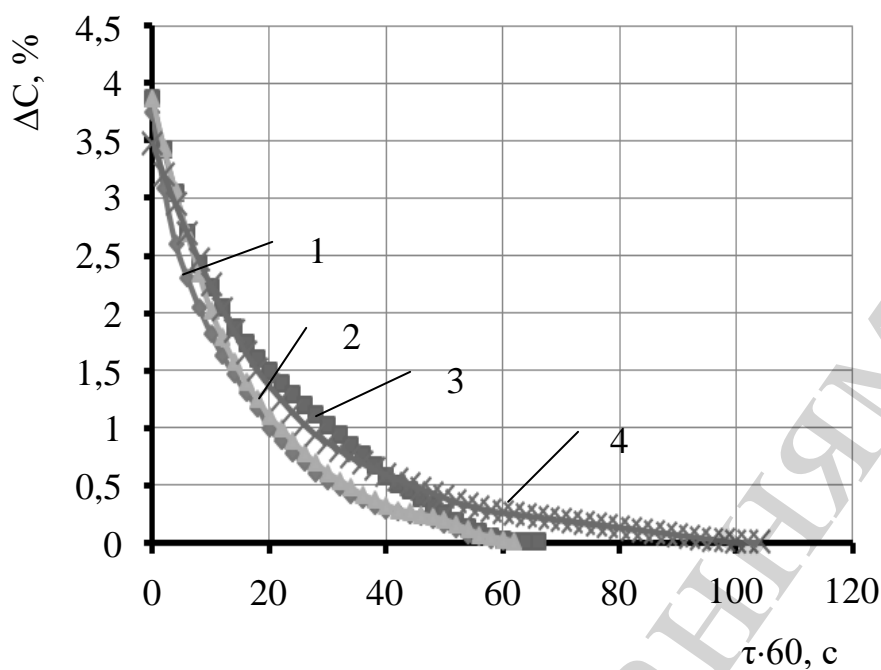
На стенде № 3 проведены эксперименты по изучению гидравлики течения экстрагента через кассеты (рис. 4). Установлено, что для обеспечения тонкослойных течений в продукте, повышения поверхности фазового контакта целесообразно работать в диапазонах расходов $1,4 \cdot 10^{-6} \dots 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ и при значениях толщины слоя кофейного сырья $1 \cdot 10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

На стенде № 3 определено влияние подводимой микроволновой мощности, высоты шлама, объемного расхода экстрагента на кинетику извлечения веществ из шлама (рис. 5).

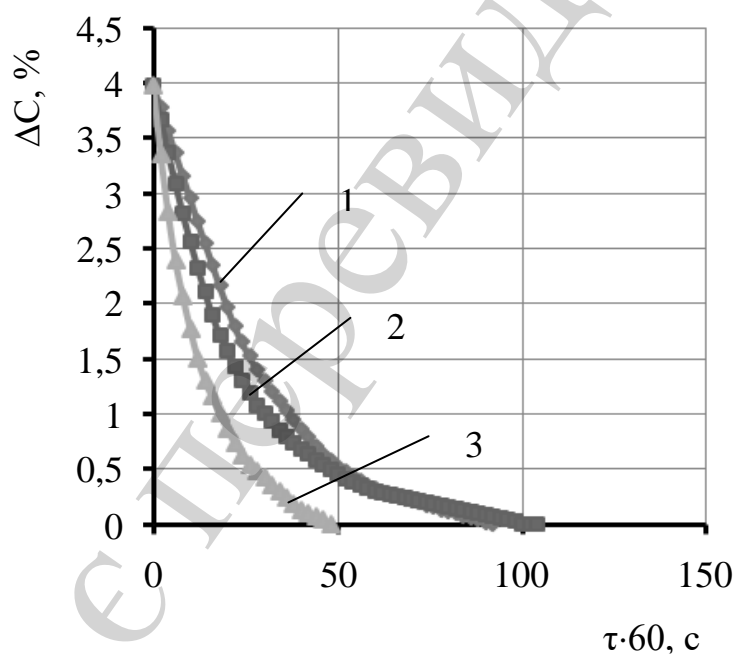
Наблюдения показали (рис. 5, а), что повышение мощности МВ энергии повышает выход экстрактивных веществ из кофейного шлама более чем в два раза и существенно уменьшает продолжительность, а, следовательно, уменьшает энергоемкость процесса производства экстрактов кофе из кофейного сырья.

Установлено, что при увеличении объемного расхода экстрагента в 3 раза выход экстрактивных веществ из шлама повышается на 35 % и сокращается время экстрагирования в 2 раза (рис. 5, в). Это является фактором существенного снижения внешнего диффузионного сопротивления. При увеличении скорости потока в 2,5...3,5 раза эффективный коэффициент массоотдачи увеличивается в 2,7...5 раз соответственно.





б



в

Рис. 5. Кинетика массопереноса водорастворимых веществ в МВ-поле: *а* – подводимая микроволновая мощность: 1 – 270 Вт/кг; 2 – 630 Вт/кг; 3 – 450 Вт/кг; 4 – 900 Вт/кг; *б* – высота слоя шлама: 1 – $\delta=0,008$ м; 2 – $\delta=0,014$ м; 3 – $\delta=0,020$ м; 4 – $\delta=0,027$ м; *в* – объемный расход экстрагента: 1 – $V=1 \cdot 10^{-6}$ м³/с; 2 – $V=2 \cdot 10^{-6}$ м³/с; 3 – $V=3 \cdot 10^{-6}$ м³/с

В результате обработки массива экспериментальных данных получено соотношение, которое учитывает влияние чисел Рейнольдса, Шмидта и числа энергетического действия (Bu) и рекомендуется для расчета интенсивности

массопереноса при экстрагировании из кофейного шлама в условиях действия микроволнового поля:

$$St_m = 0,004 (Re)^{-0,5} (Sc)^{0,43} (\Pi)^{0,6} (Bu)^{0,33}, \quad (1)$$

где St_m – число Стантона массообменное; Re – число Рейнольдса; Sc – число Шмидта; Π – безразмерная параметрическая проницаемость; Bu – число Бурдо.

Максимальная относительная погрешность расчета по соотношению (1) составляет 17,6 % и наблюдается при малых значениях числа Стантона.

Для того чтобы установить влияние действия микроволнового поля на интенсивность процесса экстрагирования, опыты проводились как в условиях традиционного теплового подвода энергии, так и в микроволновом поле.

Сравнение интенсивности экстрагирования в микроволновом экстракторе (стенд № 4) и в термостате (стенд № 1) без режима кипения экстрагента приведено на рис. 6, 7.

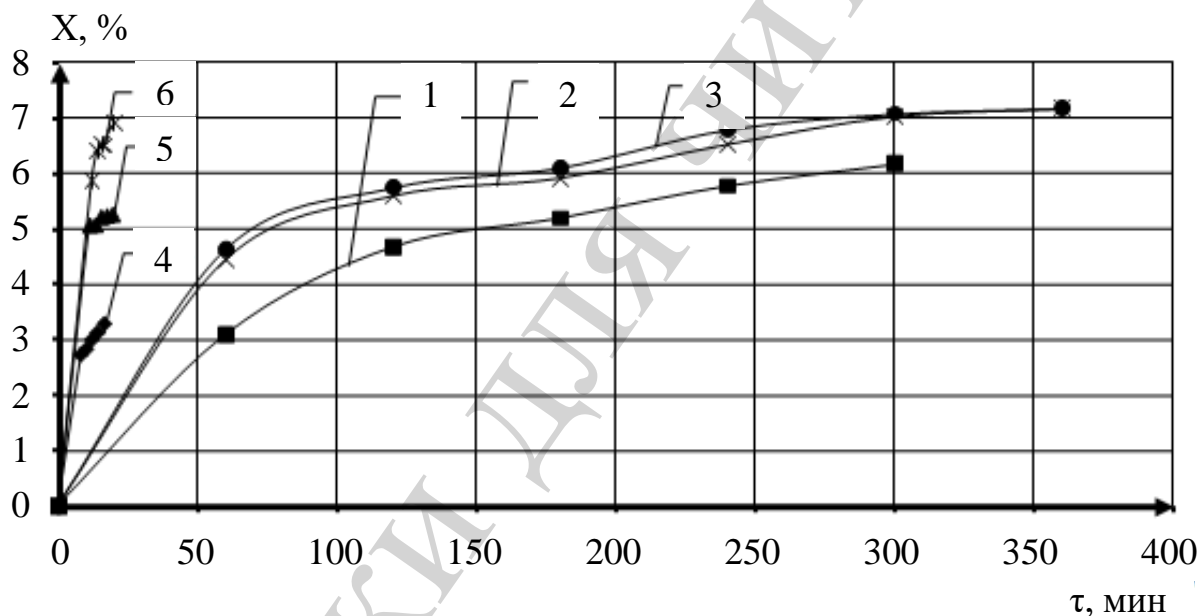


Рис. 6. Влияние характера подвода энергии на экстрагирование гексаном: 1 – термостат, 40 °C; 2 – термостат, 50 °C; 3 – термостат, 60 °C; 4 – в МВ поле, 40 °C; 5 – в МВ поле, 50 °C; 6 – в МВ поле, 60 °C

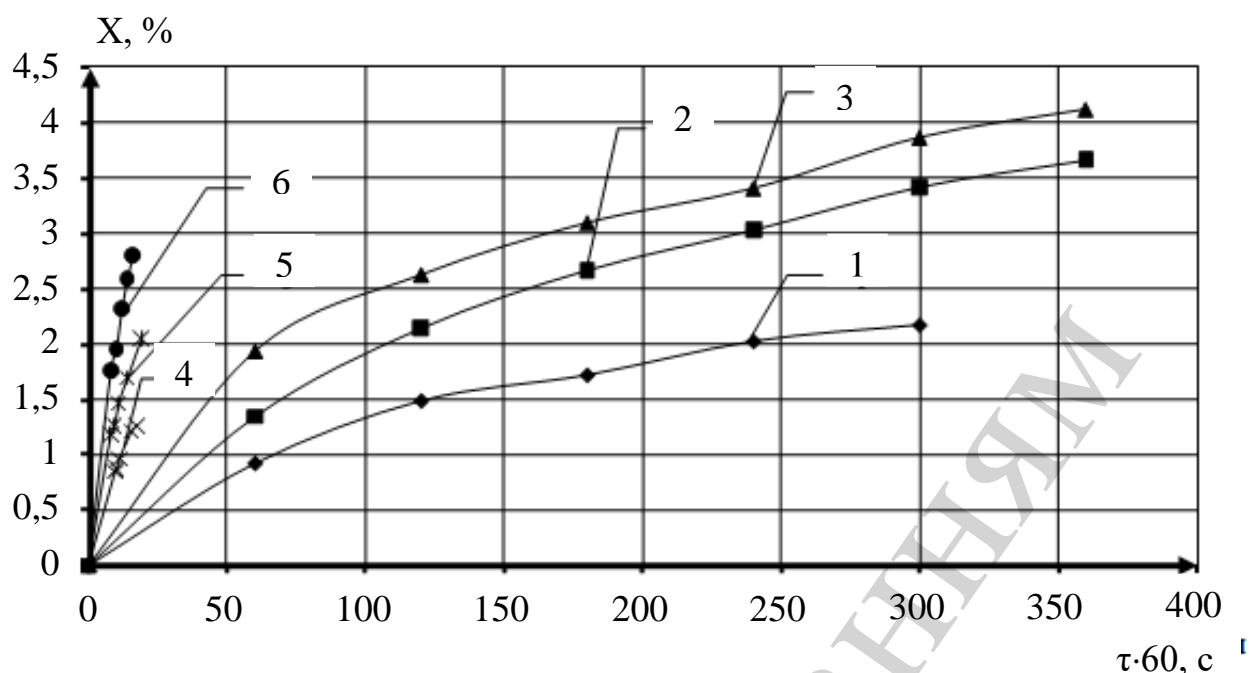


Рис. 7. Влияние характера подвода энергии на экстрагирование этанолом: 1 – термостат, 40 °С; 2 – термостат, 50 °С; 3 – термостат, 60 °С; 4 – в СВЧ поле, 40 °С; 5 – в СВЧ поле, 50 °С; 6 – в СВЧ поле, 60 °С

В микроволновом поле с увеличением температуры увеличивается скорость извлечения экстрактивных веществ из шлама (рис. 6, 7), а в условиях кипения растворителя скорость процесса и количество извлеченных веществ значительно больше, что объясняется турбулизацией приграничного слоя.

Обработка массива экспериментальных данных определила для расчетов процесса массопереноса масла из кофейного шлама в условиях действия микроволнового поля уравнения для спирта этилового (2) и для гексана (3).

$$Sh = 0,0137(Sc)^{0,33}(\Gamma)^{0,15}(Bu)^{0,71}, \quad (2)$$

$$Sh = 0,01(Sc)^{0,33}(\Gamma)^{0,05}(Bu)^{0,32}, \quad (3)$$

где Sh – число Шервуда; Sc – число Шмидта; Γ – гидромодуль; Bu – число Бурдо.

Этанол, в отличие от гексана, способствует переходу в экстракт дополнительно ароматических компонентов.

5. 3. Инновационная технологическая линия предэкстрагирования кофе из шлама

Ставится задача в непрерывном противоточном режиме осуществить дополнительное извлечение водорастворимых веществ из шлама. Решение задачи основано на использовании микроволновых технологий экстрагирования. Представляется целесообразным в экстракционные батареи подавать не чистую воду (как предусмотрено традиционной технологией), а экстракт, предвари-

тельно насыщенный компонентами кофе, извлеченными из шлама. Процесс такой подготовки экстрагента называли «предэкстрагирование», а производственный комплекс для реализации этой задачи, соответственно, линией «предэкстрагирования» из кофейного шлама (ЛПЭШ). По предложенной схеме (рис. 8) в диффузионные батареи направляется экстракт с концентрацией до 2...4 %. Обедненная твердая часть шлама идет на дальнейшую переработку. Процессы в ЛПЭШ протекают в такой последовательности. Шлам из бункера 1 подается шнеком 2 на пункт загрузки шлама в кассеты 3. Далее кассеты с сырьем поступают в МВ экстрактор 4, где проходит экстрагирование шлама водой при температуре 80...95 °С. Из экстрактора отделенная твердая часть подается на сушку, а жидкая – через фильтр 6 в промежуточную емкость 7, откуда экстракт концентрацией до 2...4 % направляется в экстракционные батареи.

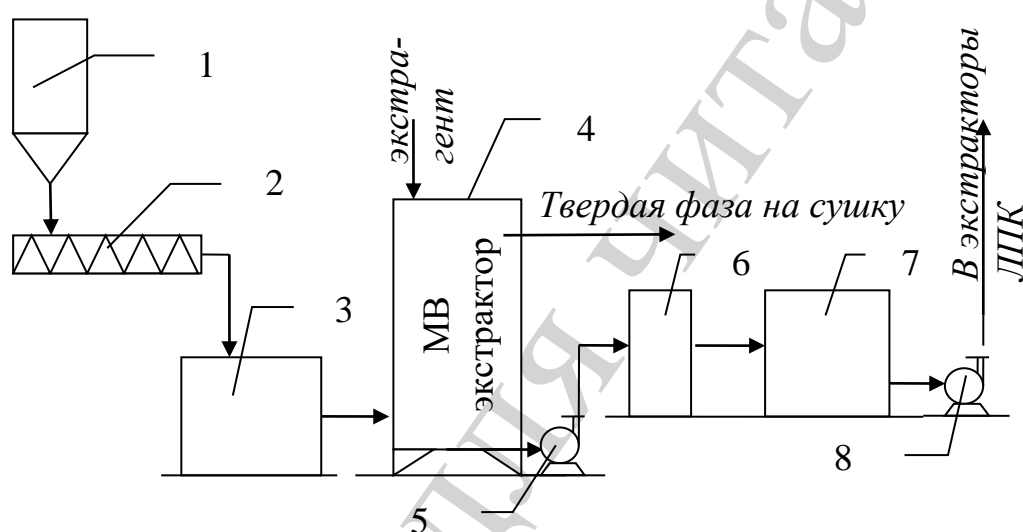


Рис. 8. Схема линии предэкстрагирования из кофейного шлама: 1 – бункер, 2 – шнек, 3 – пункт загрузки шлама в кассеты, 4 – МВ экстрактор, 5 – насос, 6 – фильтр, 7 – промежуточная емкость, 8 – насос

Ключевым элементом в ЛПЭШ (рис. 8) является микроволновой экстрактор. Разработан опытный образец установки с параметрами, приведенными в табл. 3.

Таблица 3
Характеристики полупромышленной установки – МВ экстрактора

Параметры	МВ экстрактор
Потребляемая мощность МВ излучателей, кВт	$\leq 7,3$ кВт
Рабочий объем, л	180
Габаритные размеры установки (д/ш/в), м	0,52/0,68/2,05
Производительность по сырью, кг/ч	≤ 24

Экспериментально-промышленный образец МВ экстрактора [4] является аппаратом непрерывного действия, предназначен для системы «твердое тело – жид-

кость». Корпус выполнен из каскада резонаторных камер из нержавеющей стали с магнетронами, при этом дно верхних камер соединяется с поверхностью нижних камер шлюзовыми каналами. Через эти каналы перемещаются блоки кассет с сырьем. Кассеты имеют на крышке отверстие, в которое вводится штуцер с верхней кассеты. Штуцер размещен на дне кассеты в противоположной отверстию зоне. Вход в отверстия самой верхней кассеты соединяется с входной емкостью с экстрагентом, а штуцер самой нижней кассеты размещен в зоне накопителя экстрагента, выход из которого соединяется с емкостью готового продукта. Каждая из камер оснащена панелью управления с цифровым дисплеем уровня мощности и таймером. Предусмотрена возможность регулирования в достаточном диапазоне расхода экстрагента, и скорости движения твердой фазы.

Методами тепловых балансов при подводимой микроволновой мощности $N=900$ Вт и потоке воды исследовалось распределение энергии в зависимости от загрузки кассет камеры, которая изменялась от 0,15 до 0,75 кг.

Результаты исследований показали, что с увеличением загрузки кассеты в 5 раз суммарная мощность теплового потока увеличивается на 86 %. Установлено, что при работе двух камер установки (2 и 4) суммарная мощность теплового потока составила $\sum Q=1186$ Вт. При работе трех камер установки (1, 3 и 5) суммарная мощность теплового потока составила $\sum Q=1954$ Вт. Наблюдения показали, что на распределение мощности теплового потока влияет расположение кассеты относительно микроволнового излучателя, следующим образом: чем дальше кассета удалена от излучателя, тем меньше полезная мощность теплового потока.

5. 4. Технологическая схема для переработки кофейного шлама

Линия включает сушилку, в которой шлам начальной влажностью 80...82 % высушивается до влажности 8...10 %, экстрактор-концентратор, в котором экстрагируется и концентрируется масло. Сухой обезжиренный шлам может быть использован в качестве топлива, наполнителя для комбикормов и т. п.

Ключевым элементом в схеме является микроволновой экстрактор. Изготовлен опытный образец микроволнового экстрактора. По сути, это многофункциональная установка, которая выполняет главную операцию – экстрагирование масла из шлама, и дополнительную – отгонку экстрагента из отработавшей твердой фракции [4].

Технические характеристики аппарата приведены в табл. 4.

Таблица 4

Технические характеристики микроволнового экстрактора масла

№	Параметр	Значение
1	Мощность магнетрона	3 кВт
2	Реакционный объем	0,02 м ³
3	Масса шлама	1,6...6,0 кг
4	Выход масла	13...20 %
5	Время экстрагирования	30...90 мин

Выход масла отнесен к массе сухого шлама. Аппарат с параметрами (табл. 4) прошел стендовые испытания. Испытания образца экстрактора проводились при удельной мощности 180...240 Вт/кг смеси в режиме кипения экстрагента. В качестве экстрагента использовался этанол (концентрация 93...96 %).

В результате испытаний получено кофейное масло, которое характеризуется выраженным ароматом и вкусом кофе и интенсивной темно-коричневой окраской.

Выполненные исследования использованы в линии переработки кофейного шлама. На первом этапе проводится «предэкстрагирование», а на втором – производство масла кофе и пеллет (рис. 9).

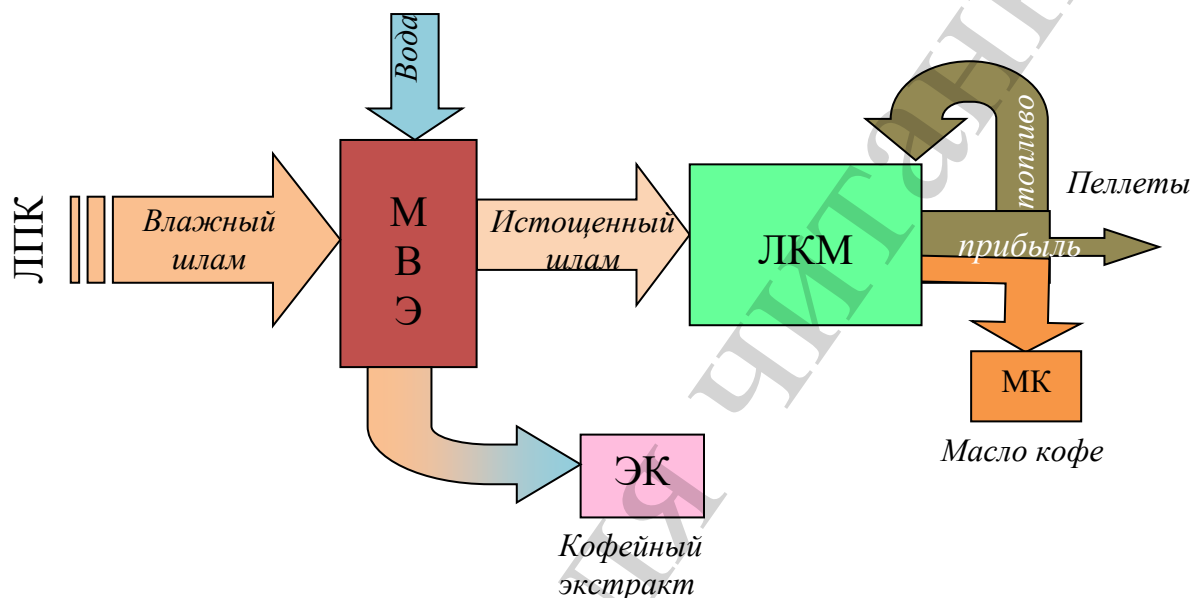


Рис. 9. Диаграмма распределения потоков сырья: ЛПК – линия производства кофе, ЛКМ – линия получения кофейного масла, МВЭ – микроволновый экстрактор, МК – масло кофе, ЭК – кофейный экстракт

Из линии производства кофе (ЛПК) влажный кофейный шлам идет в МВ экстрактор, куда также поступает экстрагент – вода. После экстрагирования имеются два потока веществ – кофейный экстракт и твердая фаза (истощенный водорастворимыми компонентами шлам). Далее шлам идет на линию получения кофейного масла (ЛКМ). Обезжиренный шлам подается на линию производства пеллет (ЛП). Пеллеты могут служить в качестве топлива на предприятии, в частности в сушилке шлама линии ЛП. Избыток пеллет может реализовываться и давать прибыль [4].

5.5 Технологическая схема производства жидкого концентрата кофе

Принципиальная технологическая схема такой линии полностью соответствует (рис. 8). Отличие в том, что кассеты загружаются измельченными зернами кофе. Уровни температур процесса не превышают 100 °С, давление в аппарате атмосферное. Наиболее привлекательным является исключение из технологии конвективной сушки. Именно в сушилке наибольшие потери ароматиче-

ских компонентов, именно сушка связана с основными затратами энергии. Поэтому, ожидается по схеме (рис. 8) два положительных эффекта: существенное повышение качества готового продукта при резком снижении удельных затрат энергии на производство готового продукта. Естественно, переход на предлагаемую технологию связан с определенными сложностями, но ожидаемый эффект оправдывает их преодоление.

В настоящей работе получены опытные образцы жидкого концентрата кофе на МВ экстракторе и проведены их дегустационные исследования. Образцы отличались повышенным содержанием ароматических компонентов и оригинальными оттенками вкуса.

6. Обсуждение результатов проведения энергетического, экологического аудита и исследований процесса микроволнового экстрагирования

При всех значениях высоты слоя шлама 27 мм, 20 мм, 14 мм (соответственно линии 1, 2 и 3, рис. 4) полученные зависимости – это выпуклые кривые, в то время как классическая зависимость имеет вогнутый характер. Объясняется этот «парадокс» тем обстоятельством, что горизонтальные потоки сообщают энергию частицам кофейного сырья, толщина слоя растет и его пористость повышается. В результате наблюдается снижение гидравлического сопротивления слоя. Это свидетельствует о благоприятном для процессов экстрагирования явлении: гидродинамическая ситуация с таким псевдооживлением слоя однозначно будет способствовать интенсификации процессов переноса.

Для неполярного экстрагента – гексана, которого скорости экстрагирования при кипении и при 60 °С (рис 6) достаточно близки. Это можно объяснить тем, что МВ энергия поглощается в основном влагой, которая содержится в капиллярах шлама, а гексан нагревается уже от шлама. То есть паровая фаза в капиллярах, а соответственно и бародиффузионный поток образуется в сырье уже при низких температурах экстрагента. Кроме того изомеры гексана, кипят при температурах 49,7; 58 и 60,3 °С, что также может вызывать частичную турбулизацию пограничного слоя при температурах ниже температуры кипения.

Важную роль при экстрагировании в МВ поле играет вид экстрагента. Если в традиционных технологиях более эффективными считаются растворители гексан, нефрас и т.п., то в условиях МВ поля предпочтительней оказывается этанол. Полярные молекулы этанола усиливают эффект бародиффузии и способствуют интенсивному массопереносу.

Этанол, в отличие от гексана, способствует переходу в экстракт дополнительно ароматических компонентов, что в ряде технологий оказывается привлекательней.

Благодаря проведенному системному анализу теплотехнологий производства растворимого кофе выявлены основные недостатки:

- значительная энергоемкость оборудования и длительность технологического процесса (7...8 ч);
- использование высокого давления в экстракторах (0,3...1,5 МПа);
- потеря ценных легколетучих вкусовых и ароматических веществ (более 80 % от начального количества в обжаренных зернах);

- низкий выход целевого компонента (20...33 % от массы сырых зерен);
- отходы производства (кофейный шлам) создают экологически опасную ситуацию, загрязняя окружающую среду.

На основе анализа «узких мест» предложены способы их устранения. А именно, разработана система инновационных теплотехнологий производства кофе (рис. 2), новые технологические линии: схема линии предэкстрагирования из кофейного шлама (рис. 8), технологическая схема для переработки кофейного шлама, технологическая схема производства жидкого концентрата кофе.

Проведенные исследования кинетики экстрагирования водорастворимых веществ и масла из кофейного шлама дали возможность разработать конструкцию универсального энергоэффективного МВ экстрактора, который обеспечивает режимы работы при температурах до 100 °С и атмосферном давлении. Испытания конструкции в промышленном масштабе показали его высокую эффективность (табл. 3).

Ограничением на использование результатов является то, что разработанная модель (1) работает только в диапазоне изменения определяющих чисел подобия ($5 \leq Re \leq 50$; $3,82 \cdot 10^{-8} \leq Bu \leq 15,2 \cdot 10^{-8}$; $2,07 \cdot 10^3 \leq Sc \leq 2,89 \cdot 10^3$; $93,3 \cdot 10^{-2} \leq P \leq 346,9 \cdot 10^{-2}$).

Модели (2), (3) работают только в диапазоне изменения определяющих чисел подобия ($0,07 \leq \Gamma \leq 0,42$; $0,06 \leq Bu \leq 2,94$; $183,6 \leq Sc \leq 303,9$).

В качестве дальнейших исследований можно рекомендовать поиск общих решений полученных моделей в числах подобия (1)–(3) и моделей процессов тепломассопереноса в капиллярных структурах при адресной доставке энергии.

В дальнейшем провести структурную и параметрическую оптимизацию технологических систем для наиболее эффективного использования энергии и ресурсов.

7. Выводы

1. В результате энергетического и экологического аудита показано, что из экологически проблемных отходов предприятием может быть получена ощутимая прибыль. Коммерческая привлекательность проектов определяется за счет:

- дополнительного извлечения из шлама кофе растворимых водой экстрактивных веществ, что повышает выход экстракта на 10...12%;
- дорогого и качественного масла кофе (рафинированного и кофеоля), спрос на которое на рынке повышается;
- топливных элементов – пеллет. Экспериментально установлены характеристики пеллет, полученных из кофейного шлама. Температура их горения – 515 °С, а теплотворная способность – 17 МДж/кг.

2. В результате экспериментального моделирования кинетики экстрагирования установлено, что продолжительность процесса в микроволновом поле приблизительно в 20 раз меньше, чем в термостате (рис. 6, 7). Действие МВ поля влияет на скорость экстрагирования в большей мере, чем температура процесса. Повышение мощности МВ энергии повышает выход экстрактивных веществ из кофейного шлама более чем в два раза (рис. 5, а) и уменьшает продолжительность, уменьшается энергоемкость процесса производства экстрак-

тов кофе из кофейного сырья. Установлено, что при увеличении объемного расхода экстрагента в 3 раза выход экстрактивных веществ из кофейного шлама повышается на 35 % и сокращается время экстрагирования в 2 раза (рис. 5, в).

В традиционных технологиях более эффективными в качестве экстрагентов признаны гексан и нефрас. Однако наблюдается существенная интенсификация процесса экстрагирования этанолом в МВ поле. Более того, извлечение масла и экстрактивных веществ в МВ поле спиртом больше, чем гексаном и нефрасом.

Рекомендуется для расчетов процессов экстрагирования в МВ экстракторах уравнение в критериальной форме зависимости числа Стантона массообменного от чисел Шмидта, Бурдо и параметрического комплекса – гидромодуля, для спирта этилового (2) и для гексана (3).

3. Разработанная технология экстрагирования в МВ поле направлена на устранение некоторых недостатков традиционных подходов, сохранила все достоинства традиционных принципов экстрагирования и приобрела ряд новых преимуществ. Технологические преимущества: выход целевых компонентов из сырья увеличивается на 10...15 % при существенном снижении температурного режима экстрагирования, что способствует повышению качества готового продукта; значительное (практически на порядок) сокращение продолжительности процесса при практическом отсутствии потерь продукта. Экономические преимущества: компактность оборудования, его доступная стоимость изготовления и эксплуатации, связанная с простотой и надежностью конструкции, умеренные затраты энергии на процесс (табл. 3).

4. Привлекательные качества микроволнового экстрактора масла: относительно низкая стоимость изготовления и эксплуатации, связанная с простотой конструкции; низкое энергопотребление; использует в качестве сырья отходы производства. Аппарат с параметрами (табл. 4) прошел стендовые испытания. Испытания образца экстрактора проводились при удельной мощности 180...240 Вт/кг в режиме кипения экстрагента. В качестве экстрагента использовался этанол (концентрация 93...96 %).

В результате испытаний получено кофейное масло, которое характеризуется выраженным ароматом и вкусом кофе и интенсивной темно-коричневой окраской.

5. Разработанная технологическая линия позволяет получать концентрированный экстракт кофе – основу для напитков на базе кофе, готовых к немедленному употреблению. Концентрация сухих веществ составляет 50...65 %. Инновационный ассортимент кофе: с сахаром, без сахара, с коньяком, с молоком и т. д. Он с успехом может использоваться как отдельный продукт или как ингредиент кондитерских и молочных изделий.

Литература

1. Clapp, J., Newell, P., Brent, Z. W. (2017). The global political economy of climate change, agriculture and food systems. *The Journal of Peasant Studies*, 45 (1), 80–88. doi: <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602>
2. Govindan, K. (2018). Sustainable consumption and production in the food supply chain: A conceptual framework. *International Journal of Production Economics*, 195, 419–431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003>

3. Huang, M., Zhang, M. (2013). Tea and coffee powders. Handbook of Food Powders, 513–531. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857098672.3.513>
4. Бурдо, О. Г., Терзиев, С. Г., Ружицкая, Н. В., Макиевская, Т. Л. (2014). Процессы переработки кофейного шлама. Киев: ЭнтерПринт, 228.
5. Терзиев, С. Г., Левтринская, Ю. О., Бурдо, О. Г. (2015). Совершенствование теплотехнологий производства кофе. Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій], 2 (47), 81–87.
6. Atabani, A. E., Al-Muhtaseb, A. H., Kumar, G., Saratale, G. D., Aslam, M., Khan, H. A. et. al. (2019). Valorization of spent coffee grounds into biofuels and value-added products: Pathway towards integrated bio-refinery. Fuel, 254, 115640. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115640>
7. Sarno, M., Iuliano, M. (2018). Active biocatalyst for biodiesel production from spent coffee ground. Bioresource Technology, 266, 431–438. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.108>
8. Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. Biotechnology Advances, 36 (2), 452–466. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
9. Jeguirim, M., Limousy, L., Dutournie, P. (2014). Pyrolysis kinetics and physicochemical properties of agropellets produced from spent ground coffee blended with conventional biomass. Chemical Engineering Research and Design, 92 (10), 1876–1882. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.04.018>
10. Limousy, L., Jeguirim, M., Dutournié, P., Kraiem, N., Lajili, M., Said, R. (2013). Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. Fuel, 107, 323–329. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.019>
11. Javaid, A., Ryan, T., Berg, G., Pan, X., Vispute, T., Bhatia, S. R. et. al. (2010). Removal of char particles from fast pyrolysis bio-oil by microfiltration. Journal of Membrane Science, 363 (1-2), 120–127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.07.021>
12. Edathil, A. A., Shittu, I., Hisham Zain, J., Banat, F., Haija, M. A. (2018). Novel magnetic coffee waste nanocomposite as effective bioadsorbent for Pb(II) removal from aqueous solutions. Journal of Environmental Chemical Engineering, 6 (2), 2390–2400. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.041>
13. Kida, K., Ikbal, Sonoda, Y. (1992). Treatment of coffee waste by slurry-state anaerobic digestion. Journal of Fermentation and Bioengineering, 73 (5), 390–395. doi: [https://doi.org/10.1016/0922-338x\(92\)90285-3](https://doi.org/10.1016/0922-338x(92)90285-3)
14. Passos, C. P., Rudnitskaya, A., Neves, J. M. M. G. C., Lopes, G. R., Evtuguin, D. V., Coimbra, M. A. (2019). Structural features of spent coffee grounds water-soluble polysaccharides: Towards tailor-made microwave assisted extractions. Carbohydrate Polymers, 214, 53–61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.094>
15. Tsukui, A., Santos Júnior, H. M., Oigman, S. S., de Souza, R. O. M. A., Bizzo, H. R., Rezende, C. M. (2014). Microwave-assisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC. Food Chemistry, 164, 266–271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.039>

16. Pavlović, M. D., Buntić, A. V., Šiler-Marinković, S. S., Dimitrijević-Branković, S. I. (2013). Ethanol influenced fast microwave-assisted extraction for natural antioxidants obtaining from spent filter coffee. *Separation and Purification Technology*, 118, 503–510. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.07.035>
17. Ranic, M., Nikolic, M., Pavlovic, M., Buntic, A., Siler-Marinkovic, S., Dimitrijevic-Brankovic, S. (2014). Optimization of microwave-assisted extraction of natural antioxidants from spent espresso coffee grounds by response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, 80, 69–79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.060>
18. Oliveira, N. A. de, Cornelio-Santiago, H. P., Fukumasu, H., Oliveira, A. L. de. (2018). Green coffee extracts rich in diterpenes – Process optimization of pressurized liquid extraction using ethanol as solvent. *Journal of Food Engineering*, 224, 148–155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.021>
19. Araújo, M. N., Azevedo, A. Q. P. L., Hamerski, F., Voll, F. A. P., Corazza, M. L. (2019). Enhanced extraction of spent coffee grounds oil using high-pressure CO₂ plus ethanol solvents. *Industrial Crops and Products*, 141, 111723. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111723>
20. Su, Y., Zhang, M., Zhang, W., Liu, C., Bhandari, B. (2017). Low oil content potato chips produced by infrared vacuum pre-drying and microwave-assisted vacuum frying. *Drying Technology*, 36 (3), 294–306. doi: <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1326500>
21. Kumar, C., Karim, M. A. (2017). Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (3), 379–394. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
22. Burdo, O., Bezbakh, I., Kepin, N., Zykov, A., Yarovyi, I., Gavrilov, A. et. al. (2019). Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (11 (101)), 24–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937>
23. Бурдо, О. Г. (2008). Энергетический мониторинг пищевых производств. Одесса: Полиграф, 244.