

Овсянников В.Ю., Дранникова Н.Е.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭКСТРАКЦИОННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Ключевые слова: экстрагирование, ультразвук, биологически активные вещества.

Аннотация. Рассмотрены особенности ультразвукового воздействия на биотехнологическое сырье растительного и животного происхождения при экстрагировании полезных компонентов. Описан механизм энергетического воздействия на сырье, растворитель звукового поля, а также влияние режимных параметров на основные характеристики процесса. Показана положительная динамика комплексного волнового и диффузионного воздействия на характер и выход биологических веществ из растительного сырья. Выполненные исследования по экстрагированию сычужного фермента из измельченных сычугов телят показало увеличение температуры озвучиваемой среды на 13°C и изменения рН за счет образования радикалов H^+ и OH^- вследствие кавитации. Установлено, что во время первых 4-х минут озвучивания смеси измельчённых сычугов телят и растворителя величина рН раствора снижается незначительно, а впоследствии меняется на противоположную после 5-й минуты. Затем следует повторное снижение, после 20 минут, и озвучивание. Данное явление объяснили образованием значительного количества свободных радикалов HCl в пределах микросекундного интервала озвучивания, после чего отмечали изменение реакции на обратную. Показаны перспективы исследований в данной области с точки зрения дальнейшего совершенствования и развития.

Введение

Извлечение биологически активных веществ и соединений из растительного и животного сырья экстрагированием – классический процесс, достаточно широко применяемый в пищевой, фармацевтической, косметической и ряде других отраслей промышленности.

Традиционно используемые методы, такие как экстракция растворителем, дистилляция в среде водяного пара, эффект высокого гидростатического давления и противотока характеризуется использованием значительного количества растворителя, длительностью протекания самого процесса, относительно низкими выходами растворенного вещества, достаточно высоким потреблением энергии, а также отрицательным влиянием на экологическую обстановку окружающей среды [8]. Кроме того, применяемые режимы высокого давления и температуры зачастую влияют на качество экстрактов, а иногда разрушают активный компонент. Последние годы приобретают особую популярность технологии, основанные на высокоэффективных экстракционных методах, позволяющих эффективно выделять биологические активные компоненты из растительной и животной ткани практически без потерь биологической активности, а в некоторых случаях даже позволяющих её повысить. К ним следует отнести экстрагирование с помощью ультразвуковых воздействий, экстракцию сверхкритическими веществами, а также в поле микроволнового излучения.

Из вышеперечисленных методов экстрагирования извлечение веществ с помощью ультразвука является наиболее экономичной с энергетической точки зрения, а также требует значительно меньшего количества специальных инструментов и приспособлений. Её применение целесообразно в тех случаях, когда биологическая стабильность исходного сырья или активного компонента, который извлекается в процессе экстрагирования, чувствительна к высоким температурам, характерным для традиционных методов экстрагирования.

Методом ультразвукового экстрагирования получены, в частности, такие соединения, как эфирные масла, ароматические композиции, изофлавоноиды, полифенолы, пигменты сапонины, адреналин, инсулин, лидаза, пантокрин, а также ряд гормональных, витаминных и ферментных препаратов. Цель данного исследования заключается в оценке текущего состояния, механизма, режимных параметров, определяющих характер и особенности экстрагиро-

вания различных биологических соединений, а также перспектив исследований в данной области с точки зрения совершенствования и развития. Ультразвуковое воздействие основано на явлении кавитации, обусловленной образованием, ростом и резким схлопыванием пузырьков газа или водяного пара, возникающего в результате действия ультразвукового поля внутри жидкости. Продолжительность существования указанных пузырьков составляет, как правило, порядка микросекунд, резкое схлопывание вызывает локальное и кратковременное повышение температуры внутри самого пузырька, давление почти до 100 МПа и образование радикальных соединений, а групп OH^\cdot и OON^\cdot , а также перекиси водорода H_2O_2 .

Частицы твердой и жидкой фазы в среде колеблются и ускоряются за счёт энергетического потенциала ультразвукового поля, в результате чего растворимое вещество интенсивно переходит из твердой фазы в растворитель. Кроме того, повышение эффективности экстрагирования растворённых веществ напрямую связано с распространением ультразвуковой волны давления внутри самого растворителя, кавитацией, а также сопровождающимися тепловыми и механическими эффектами. Резкое схлопывание кавитационных пузырьков газа и пара инициирует микротурбулентность, высокоскоростные столкновения частиц внутри среды и возмущение в микроскопических порах биомассы, что в результате ускоряет эффекты внутренней диффузии. Из-за ограниченного пространства большая часть пузырьков газа и пара при расширении схлопывается симметрично, а это приводит к интенсивной турбулентности усиления циркуляции потока жидкости. Кавитация также вызывает разрушение поверхности клеточных стенок, разрыв частиц на эродированных новообразованиях.

На основании анализа электронной микроскопии было установлено, что механические воздействия, создаваемые ультразвуком, изменяют морфологию материала, формируя так называемую губчатую или пористую структуру. Совокупность всех этих физических эффектов обуславливает разрыв стенок растительных и животных клеток, уменьшение размера частиц, увеличение количества вещества, переносимого через клеточную мембрану. Кроме того, ультразвуковое излучение способствует многократной регидратации озвучиваемой ткани и расширению пор клеток, благодаря чему вещества, находящиеся во внутренних и наружных капиллярах и кавернах, извлекаются интенсивнее. За счёт диспергирования частиц сырья повышается площадь контакта между твердой фазой и растворителем, что способствует более интенсивному массопереносу растворимых веществ за счёт протекания диффузионных и осмотических процессов. Разрыв клеточных стенок, вызванный ультразвуковой кавитацией, значительно повышает проницаемость озвучиваемой ткани и облегчает поступление растворителя в труднодоступные зоны обрабатываемого материала, значительно повышает выход экстракта с последующим увеличением выхода активного начала. Это требует значительно меньшего времени по сравнению с традиционным экстрагированием. В настоящее время исследований по извлечению активных соединений ультразвуковым воздействием в промышленных масштабах представлено не так много. Хотя существует большой спрос на его использование в качестве более дешёвого альтернативного традиционного способа экстрагирования. С этой целью разрабатываются более крупные установки и проводятся теоретические исследования по моделированию основных параметров определяющих максимальную эффективность экстрагирования биологически активных соединений, а также соотношение растворителя и твердой фазы, характерное для достижения максимального эффекта в каждом конкретном случае [4].

Объекты и методы исследований

В результате анализа процесса экстрагирования с наложением ультразвукового излучения следует оценить группы параметров, оказывающих наибольшее влияние на интенсивность извлечения биоактивных растворимых соединений.

Выявим и сгруппируем наиболее значимые параметры процесса ультразвукового экстрагирования на основании технических и технологических признаков (табл. 1).

Таблица 1. Наиболее значимые параметры процесса ультразвукового экстрагирования

Технические параметры	Технологические параметры
Конфигурация озвучиваемого пространства	Температура технологической среды
Частота и интенсивность звукового поля	Характер растворителя
Продолжительность ультразвуковой обработки	Гидромодуль (соотношение твердой и жидкой фаз)

В лабораторной практике для изучения процессов экстрагирования под воздействием ультразвукового излучения приобрели наибольшую популярность ультразвуковые установки с направленными источниками излучения и ультразвуковые ванны (рис. 1).



Рисунок 1. Типы ультразвуковых установок

а) – ультразвуковая ванна; б) – установка с направленным источником излучения

В большинстве случаев также требуется использование специальных механических мешалок и термостатов, обеспечивающих поддержание постоянной температуры экстрагирования, которая повышается под воздействием энергии ультразвука. Данные технологии получили наибольшее распространение, хотя исследования привлечения активных веществ ультразвуком в промышленных масштабах до настоящего времени не получили должного распространения. Реакторы с направленными источниками излучения работают преимущественно с ультразвуковыми преобразователями зондовой конструкции, обеспечивающими передачу значительного количества энергии непосредственно в обрабатываемую смесь или плоские излучатели, располагаемые на дне реактора. Они могут находиться или не находиться в непосредственном контакте с обрабатываемой смесью. Преобразователи с направленными источниками излучения имеют некоторые недостатки, основной из которых – ослабление интенсивности излучения по мере удаления от самого источника. Интенсивность ультразвукового воздействия по мере удаления от источника излучения уменьшается экспоненциально и зависит также от мощности излучения и частоты ультразвука.

Другой недостаток данных установок заключается в том, что продукты разрушения самого передающего источника могут загрязнять сам обрабатываемый продукт. Ультразвуковые ванны, используемые преимущественно для очистки поверхности от загрязнений, также нашли широкое применение в изучении воздействия ультразвука ввиду их невысокой стоимости, простоты конструкции и доступности. Данный тип реакторов, как правило, оснащён одним или несколькими преобразователями в нижней части, а иногда оснащается водяной рубашкой, которую можно использовать в качестве теплообменника, но для этого следует предусмотреть циркуляцию воды в ней. В ультразвуковых ваннах при отсутствии непосредственного контакта между преобразователями и обрабатываемой средой (непрямая обработка ультразвуком) мощность ультразвука достигает смеси ниже по сравнению с другими ультразвуковыми системами.

Кроме того, воспроизводимость результатов исследований в установках данного типа достаточно низкая, поскольку энергия, воспринимаемая обрабатываемой смесью, в значительной степени зависит от того места внутри ванны, где располагается сам излучатель. С другой стороны, важно всегда использовать один и тот же конструктивный вариант ультразвуковой ванны, поскольку геометрия её сосуда влияет на звуковую картину, возникающую при обработке смеси. Другим важным недостатком является некоторая сложность поддержания постоянной температуры обрабатываемой смеси, поскольку растворитель подвергается температурному нагреву во время работы ванны. Исходя из вышеперечисленных аргументов, следует сделать вывод, что в установках, оснащенных направленными источниками ультразвукового излучения, извлекается значительно большее количество растворенного вещества по сравнению с ультразвуковыми ваннами, где, собственно, ультразвуковая обработка ведётся косвенно. Тем не менее интенсивная прямая обработка ультразвуком на высоких частотах может разрушить извлекаемые активные вещества или повлиять на качество термолабильных компонентов ввиду того, что значительное количество энергии резко выбрасывается непосредственно в обрабатываемой смеси. По этим причинам и более низкой стоимости обработка технологических сред в ультразвуковых ваннах получила наиболее широкое применение.

Таким образом, конфигурация, озвучиваемая в объёме, будет зависеть, во-первых, от характеристики используемого сырья и растворителя, а во-вторых, от характера проводимого исследования. Для повышения общего количества извлеченного вещества в процессе ультразвукового экстрагирования из растительного или животного сырья требуется использовать достаточное количество энергии. Поэтому частота и интенсивность ультразвукового излучения также являются важнейшими параметрами, которые следует оценивать в результате каждого конкретного исследования. Наиболее часто применяемые частоты лежат в диапазоне от 20 до 100 кГц и в интервале мощностей от 100 до 800 Вт. Выбор интенсивности излучения также имеет большое значение, поскольку более высокая величина способствует наиболее полному экстрагированию целевых компонентов из клеточной структуры сырья. Рассеивание интенсивности звуковой волны происходит в виде теплоты и зависит, как было отмечено ранее, от конфигурации реакционного объема и размера частиц обрабатываемого сырья.

Также следует учитывать, что повышение интенсивности ультразвуковой обработки эффективно до определённой величины, после которой невозможно изменить экстракционное равновесие. При увеличении частоты мощности может происходить ультразвуковая дегидратация активного начала, поскольку химическая реакция вещества со свободными радикалами групп водорода Н⁺ и ОН начинает превалировать над физическим перемещением вещества. Указанная особенность весьма важна при оценке экономической целесообразности ультразвукового экстрагирования. Кинетика экстрагирования должна всегда базироваться на определении оптимального времени обработки среды ультразвуком. Расчётное время экстрагирования зависит от типа и строения клеточной стенки, используемого сырья, степени прониновения растворителя в клеточную структуру и устойчивости комплекса растворимых соединений к переносу за счет молекулярной и конвективной диффузии из внутриклеточной

структуры в раствор. Обычно диапазон времени обработки ультразвуком пищевого растительного и животного сырья составляет от 120 до 3600 с, что значительно меньше времени, необходимого для реализации традиционных методов экстрагирования.

В целом при экстрагировании активных веществ с помощью ультразвука требуются более низкие температуры. Примером является экстракционное извлечение флавоноидов и фенольных соединений из растительного сырья при температурах 35-45°C. Это позволяет обеспечить значительное преимущество использования ультразвука, учитывая возможности извлечения при низких температурах крайне чувствительных соединений или термолабильных веществ. Выбор растворителя является основным этапом любого процесса экстрагирования. Необходимо использовать малотоксичные легко испаряющиеся растворители, обладающие избирательной селективностью по отношению к извлекаемому компоненту. Химические свойства растворителя, его концентрация и соотношение растворённого вещества и растворителя также являются важнейшими элементами достижения требуемого эффекта экстрагирования. При этом способность растворителя поглощать и передавать энергию ультразвуковой волны определяет эффективность самого процесса. Физические свойства растворителя напрямую влияют на характер гравитационного процесса. Интенсивность кавитации увеличивается при использовании растворителей с малой величиной поверхностного натяжения, давлением паров и вязкостью.

Другим фактором, который следует учитывать при выборе растворителя для экстрагирования с воздействием ультразвукового поля, является структура и прочность клеточной стенки обрабатываемого сырья. Полярность растворителя также влияет на эффективность экстрагирования. Вода широко используется в пищевом производстве в качестве растворителя, полярных соединений, таких как углеводы, гликозиды и аминокислоты. Полярные органические растворители, такие как спирты (этанол, метанол, н-бутанол, изопропанол) и ацетон, позволяют извлекать большинство растительных биоактивных соединений. Из них наиболее широко используется этанол, поскольку он считается самым безопасным органическим растворителем, это также относится и к водным растворам этанола. Диэтиловый эфир позволяет выделять соединения с низкой полярностью, такие как ароматические соединения. Иногда в качестве растворителя используются растворы неорганических щелочей, такие как гидроксид натрия и калия.

Результаты исследований

Исследование по применению ультразвука для экстрагирования биологически активных соединений, представляющих интерес для фармацевтической пищевой и косметической промышленности, таких как антиоксиданты, эфирные масла, сапонины и лекарственные соединения из различных видов сырья, наглядно показывает преимущества использования указанного метода по отношению к существующей технологии извлечения активных веществ (табл. 2).

Таблица 2. Преимущества использования УЗ для выделения биоактивных соединений

Биологически активное вещество	Исходное сырье	Режимные параметры УЗ обработки	Результаты
Флавоноиды	Плоды боярышника	Излучателем являлся цилиндрический волновод. Масса сухого образца 3 г, экстрагент – смесь вода дистиллированная: спирт этиловый 96% (1:1), мощность 0,5 Вт, время выдержки 2 часа.	Повышение выхода на 23,3% по сравнению с перколяцией [14]

Экстрактивные вещества	Семена томата	Частота излучателя 17-44 кГц, продолжительность экстрагирования 60 минут. Образец: измельченные семена томатов, экстрагент – вода дистиллированная, нагретая до 30-35°C, гидромодуль (1 : 3).	Продолжительность экстрагирования сократилась более чем в 8-9 раз, температура снижается с 90 до 25-30°C. При продолжительности обработки более 60 мин. наблюдается снижение массы биоактивных соединений [4]
Жирные кислоты, фенольные соединения	Семена восковой тыквы	Погружной титановый излучатель. Мощность ультразвукового озвучивания 125, 150, 370 Вт, частота 20 кГц; время озвучивания 30 мин.; температура экстрагирования 45-55°C. Образец: высушенные, измельченные до размера частиц 1,5-2 мм семена восковой тыквы, экстрагент – спирт этиловый; гидромодуль (1:10).	Наилучшие результаты получены при использовании ультразвука мощностью 65% от максимальной в течении 36 мин. при 52°C. Ультразвук не увеличил общий выход экстракта, но повысил выход фенолов, жирных кислот и антиоксидантную активность [9]
Гинсенозиды	Корень женьшеня	Излучатель цилиндрический волновод. Масса сухого образца 0,1 г, экстрагент смесь спирт метиловый: вода (1:4), время ультразвуковой обработки 30 мин.	Выход гинсенозидов составил от 80 до 110%. Показано отсутствие разрушения структуры данных веществ при проведении экстрагирования [2]
Флавоноиды	Трава гречихи	Масса навески 1 г, размер частиц 1-2 мм, экстрагент спирт этиловый, время экстракции 120-150 с, частота ультразвука 22 кГц	Выход флавоноидов повышается в 1,5-3 раза [3]
Капсаицин	Плоды острого перца	Измельчение 1-2 мм, экстрагент спирт этиловый 94%, частота ультразвука 35 кГц, мощность 128 Вт, гидромодуль (1:20–1:50), время экстрагирования 30 мин.	Сокращение времени экстракции в 2 раза, выход капсаицина более 99 % [6]
Флавоноиды	Цветки ромашки аптечной	Частота ультразвука 35 кГц, мощность 180 Вт, измельчение сырья до размера частиц 0,25-2,0 мм, изменение гидромодуля от 1:4 до 1:30	Повышение выхода суммы флавоноидов до 97% (на 35-45%), эфирного масла – до 81% [5]
Дубильные вещества, флавоноиды	Трава василька синего	Погружной излучатель «грибкового» типа, частота ультразвука 22-23 кГц с термостатированием. Высушенное измельченное сырье с размером частиц 1-5 мм, гидромодуль 1:100	Повышение экстракции дубильных веществ и флавоноидов в среднем в 1,5 раза по сравнению с контрольным опытом [7]

Фенольные соединения, в т.ч. галловая кислота	Листья филлантуса горького	Погружной излучатель (13 мм диаметр), мощность 500 Вт. Масса сухого образца – 5 г (размер частиц 0,25 и 2,0 мм) и экстрагент – вода объемом 200 мл. Время экстрагирования 7 мин., интенсивность – 301 Вт/см ² , температура 25°C.	Повышение экстракции фенольных соединений при 226 Вт/см ² в течение 5 мин, в том числе галловой кислоты в течение 3 мин. [13]
Полифенольные соединения	Цветки пижмы девичьей	Ультразвуковая ванна (для сравнения экстракция в присутствии ацетилхолин эстеразы) Масса образца 1 г, температура 30°C, экстрагент – спирт этиловый.	Получены экстракты с повышенной антиоксидантной активностью и высоким содержанием суммы фенолов в пересчете на галловую кислоту и флавоноидов в пересчете на рутин; значительная ингибирующая УЗ экстрактов на активность альфа-глюкозидазы и умеренную ингибирующую активность против α -амилазы 0,51-0,56 ммоль САЕ/г экстракта [15].
Сесквитерпен α -бисаболол	Кора кандеи	Погружной титановый излучатель, 13 мм, ячейка 250 мл в термостатируемой ванне. Мощность ультразвука 500 Вт, амплитуда 30, 60 и 90%, частота 20 кГц, температура 40, 50 и 60°C, гидромодуль – 1:10, 1:15 и 1:20, экстрагент – н-гексан, время экстрагирования 7 мин.	Сокращение времени экстрагирования в 2,5 раза и увеличение выхода α – бисаболола по сравнению с использованием аппарата Сокслета [12].
Сапонины	Листья квиллайи мыльной	Образец: высушенные, измельченные до размера частиц 0,2; 0,32; 6; 10 мм листья квиллайи мыльной, экстрагент – спирт этиловый; гидромодуль (1:6; 1:10; 1:15). Ультразвук: мощность 3-75 Вт, частота 20 кГц; полное сопротивление 80, 800 Ом; время озвучивания 10-30 мин.; температура экстрагирования 45-55°C	Ультразвук улучшил экстрагирование сапонинов. Статистически значимыми переменными, влияющими на процесс являются: измельченность (оптимум 0,2 мм), гидромодуль (оптимум 1:15) и время обработки (оптимум 30 мин.) [10].

Во всех указанных случаях при наложении ультразвукового воздействия экстрагирование происходило при более низкой температуре или при меньшем времени извлечения активных соединений по сравнению с традиционными методами, а качество извлекаемых экстрактов и их выход превосходил величины, характерные для существующих технологий экс-

трагирования. На кафедре машин и аппаратов пищевых производств в аудитории 103а Воронежского государственного университета инженерных технологий в октябре 2022 г. выполнено исследование, направленное на изучение изменения рН и температуры при экстракционном получении сычужного фермента из измельчённых сычугов телят. Обработка сырья проводилась в ультразвуковой ванне, оснащённой излучателем РХ8 частотой 22 кГц со звуковым давлением в жидкой среде не менее 80 дБ. Полученные данные обрабатывали в форме графической зависимости. Отмечено повышение температуры, изменение рН среды, вызванные явлением кавитации. По мере увеличения времени озвучивания наблюдалось увеличение температуры среды на 13 градусов Цельсия за 35 мин. Это повышение температуры является следствием прохождения ультразвуковых волн в жидкой среде с добавлением хлорида натрия, так как часть звуковой энергии в жидкой среде превращается в теплоту, способствует образованию радикалов H^+ и OH^- вследствие кавитации [11]. В течение первых 4 минут озвучивания смеси измельчённых сычугов телят и растворителя снижение значения величины рН незначительное, впоследствии оно меняется на противоположное, после 5-й минуты, а позже снова уменьшается после 20 минут и озвучивания. Вероятно, образование радикала HCl в большом количестве в пределах микросекундного интервала озвучивания, затем химическая реакция меняется на обратную. Стадию с 4-ой по 20-ю минуту можно объяснить тем, что реакция, будучи обратимой, ищет своё наиболее устойчивое состояние, стремясь вернуться к положению равновесия. Со временем происходит больше образование продукта OH , что объясняет увеличение рН в этот период.

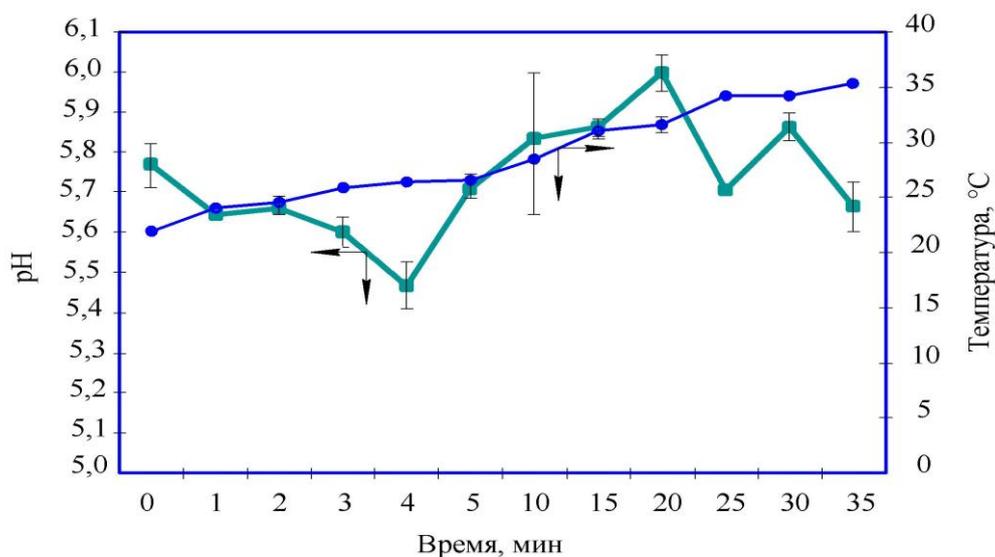


Рисунок 2. Влияние ультразвука на рН и температуру смеси измельчённых сычугов телят и раствора $NaCl$ концентрацией 6% при ультразвуковом облучении на частоте 22 кГц за время от 0 до 30 мин.

В последнее время приобретает популярность процесс экстрагирования, в котором ультразвуковое воздействие сочетается с другими технологическими приёмами извлечения веществ, такими как сверхкритические вещества и микроволновое излучение, обеспечивающие интенсификацию процессов за счёт синергетического эффекта комбинированных методов. Известно, что сверхкритические вещества – это соединения, которые при температуре и давлении, превышающем их термодинамическую критическую точку, не являются нежидкими и газообразными, но обладают свойствами обоих. За счёт этого проявляется их уникальная способность диффундировать через твёрдые тела в виде газа и растворять соединение в виде жидкости. Указанные свойства позволяют достичь значительных преимуществ, по-

скольку они полностью смешиваются с газами, тем самым образуя растворители с низкой вязкостью, не имеют поверхностного натяжения, инертны и экологически безопасны [11].

Использование сверхкритических веществ для избирательного экстрагирования различных соединений представляет значительный интерес, поскольку в клеточной структуре обрабатываемого сырья достигаются высокие скорости диффузии и лучше массоперенос при различных давлениях. В процессах разделения чаще всего применяется углекислый газ и вода, ввиду их относительной дешевизны. Примером этого является использование в пищевой и фармацевтической промышленности углекислого газа для полного выделения масел из растительных субстратов без изменения его химического состава [1]. Процессы конструкционного извлечения, при которых используется ультразвук высокой интенсивности и сверхкритической жидкости, представляют собой комплексную процедуру, при которой достигаются большие значения коэффициентов массопереноса растворённого вещества, увеличение скорости экстракции, обусловленной комбинацией процессов компрессии и декомпрессии совместно с ультразвуковым воздействием. Комбинация ультразвукового и микроволнового подвода энергии в процессах экстракции является ещё одним вариантом, используемым в последнее время для получения целевых компонентов из клеточной структуры обрабатываемого сырья. Большое количество энергии, высвобождающейся в результате внутреннего трения подвижных молекул и диполей воды, а также волновое воздействие ультразвука позволяют создать условия для улучшенного проникновения энергии в толщу сырья, разрушения стенок клеток, что позволяет быстрее элюировать извлекаемые соединения. А в результате процесс экстрагирования происходит за меньшее время, снижаются энергетические затраты на реализацию процесса, улучшается качество и выход целевого компонента в жидкую фазу [1].

Таким образом, совместное применение указанных способов энергетического воздействия в процессах экстрагирования способствует дальнейшему совершенствованию процесса выделения активных соединений с меньшим потреблением энергии.

Выводы

1. Указанные тенденции исследований, прежде всего, направлены на разработку ультразвуковых экстракторов большей мощности, в которых предлагается использовать несколько преобразователей с возможностью работы на разных частотах и которые можно использовать как в пилотных, так и в промышленных масштабах для извлечения широкого класса биологически активных соединений. Эти установки должны обеспечивать равномерное распределение кавитации внутри реакционного объема для достижения наибольшего эффекта экстрагирования. С этой целью предлагается размещать преобразователи на разных положениях рабочего объёма таким образом, чтобы отдельные волновые картины, генерируемые каждым из них, перекрывались. Это позволит равномерно увеличить эффект кавитации, обеспечить более высокую производительность, эффективность и более совершенную систему управления.

2. Ведутся работы в рамках теоретических исследований, позволяющих моделировать новые аппараты с различной геометрией и параметрами, обеспечивающими требуемое распределение температуры внутри рабочего объёма для достижения максимальных коэффициентов массопереноса, перемешивания и циркуляции технологической среды, необходимые для оптимизации равномерного максимального кавитационного воздействия ультразвуковой волны. Кроме того, исследования по оптимизации также продолжают в лабораторных исследованиях методами планирования эксперимента, позволяющими оценить такие параметры, как продолжительность обработки ультразвуком, мощность и частота ультразвуковой обработки.

3. Исследования последнего десятилетия наглядно продемонстрировали достоинства, которыми обладает ультразвук в качестве фактора интенсификации процесса экстрагирования, независимо от того, используется ли он отдельно или в сочетании с другими идентифицирующими факторами и технологическими приёмами по сравнению с традиционными методами выделения биологически активных соединений из растительного или животного сы-

рья. Наибольший эффект проявляется в сокращении времени экстрагирования и увеличении выхода и частоты экстрагируемого вещества.

4. Кроме того, процесс реализуется при более низких температурах и количестве растворителя, меньшей нагрузки на окружающую среду.

5. В настоящее время исследований по извлечению активных соединений ультразвуковым воздействием в промышленных масштабах в представленном виде не так много, хотя существует большой спрос на его использование, в качестве более дешёвой альтернативой традиционным способам экстрагирования. С этой целью разрабатываются более крупные установки и проводятся теоретические исследования по моделированию основных параметров, определяющих максимальную эффективность экстрагирования биологически активных соединений.

Список литературы

1. Анализ факторов, влияющих на эффективность извлечения биологически активных веществ из сельскохозяйственного сырья путем СВЧ экстрагирования / В.Ю. Овсянников, В.В. Торопцев, С.А. Трунов, Т.Е. Шинкарева, М.А. Лобачева // Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение: сборник научных статей и докладов по материалам VII Международной научно-практической конференции. – Воронеж, 2021. – С. 166-169.

2. Быстрый способ ультразвуковой экстракции Гинсенозидов из растительного сырья и продуктов на основе женьшеня для ВЭЖХ-МС/МС анализа / А.Н. Ставрианиди, И.А. Родин, А.В. Браун, О.А. Шпигун // Аналитика и контроль. – 2013. – № 17(4). – С. 459-464.

3. Влияние ультразвукового облучения на извлечение флавоноидов из зеленой массы гречихи / А.В. Апаева, Э.Т. Ямансарова, О.С. Куковинец, О.Б. Зворыгина // Вестник Башкирского университета. – 2016. – № 21(1). – С. 69-72.

4. Думитраш П.Г., Болога М.К., Шемякова Т.Д. Ультразвуковая экстракция биологически ктивных соединений из семян томатов // Электронная обработка материалов. – 2016. № 52(3). – С. 47-52.

5. Загорулько Е.Ю., Теслев А.А., Ожигова М.Г. Разработка и оптимизация технологии ультразвукового экстрагирования ромашки аптечной цветков (*Chamomillae Recutita flores*) // Фармация и фармакология. – 2018. – № 6(2). – С. 151-166.

6. Рудометова Н.В., Ким И.С. Исследование экстракции капсаицина из плодов острого перца рода *Capiscum* // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2019. – № 1. – С. 62-73.

7. Ультразвуковая экстракция и УФ-спектрофотометрическое определение суммы флавоноидов и дубильных веществ в надземной части василька синего / Е.А. Подолина, М.А. Ханина, О.Б. Рудаков, А.Е. Небольсин // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2018. – № 2. – С. 28-35.

8. Шинкарева Т.Е., Овсянников В.Ю. Микроволновое СВЧ излучение как фактор интенсификации процесса экстрагирования // Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений: сборник статей по материалам IX Международной научно-технической конференции. – Воронеж, 2021. – С. 505-508.

9. Vimakr M., Rahman R.A., Taip F.S., Adzahan N.M., Sarker Md.Z.I., Ganjloo A. Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Crude Oil from Winter Melon (*Benincasa hispida*) Seed Using Response Surface Methodology and Evaluation of Its Antioxidant Activity, Total Phenolic Content and Fatty Acid Composition // *Molecules*. 2012; 17(10):11748–11762.

10. Cares M.G., Vargas Y., Gaete L., Sainz J., Alarcon J. Ultrasonically assisted Extraction of bioactive principles from *Quillaja Saponaria Molina* // *Physics Procedia*. – 2010. – No 3(1). – P. 169-178.

11. Ovsyannikov V.Yu., Drannikova N.E., Makeeva E.O. Features of ultrasonic action on protein media // *Problems of scientific thought*. – 2022. – Vol. 10. – No 2. Pp. 18-21.

12. Santos K.A., Gonçalves J.E., Cardozo-Filho L., da Silva E.A. Pressurized liquid and ultrasound-assisted extraction of α -bisabolol from candeia (*Eremanthus erythropappus*) wood // *Industrial Crops and Products*. – 2019. – No 130. – P. 428-435.
13. Segovia F.J., Corral-Pérez J.J., Almajano M.P. Avocado seed: Modeling extraction of bioactive compounds // *Industrial Crops and Products*. – 2016. – No 85. – P. 213-220.
14. Valeeva A.R., Makarova N.V., Valiulina D.F. Optimisation of conditions for extracting bioactive compounds exhibiting antioxidant properties from hawthorn fruit (*Crataegus*) // *Proceedings of Universities Applied Chemistry and Biotechnology*. – 2019. No 9(2). – P. 239-249.
15. Zengin G., Cvetanović A., Gašić U., Stupar A., Bulut G., Şenkardes I., Dogan A., Sinan K. I., Uysal S., Aumeeruddy-Elalfi Z., Aktumsek A., Mahomoodally M. F. Modern and traditional extraction techniques affect chemical composition and bioactivity of *Tanacetum parthenium* (L.) Sch.Bip // *Industrial Crops and Products*. – 2020. - 146: 112202.

Овсянников Виталий Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», 394036, Воронежская обл., г. Воронеж, пр-т Революции, 19, e-mail: ows2003@mail.ru

Дранникова Надежда Евгеньевна – экстерн кафедры машин и аппаратов пищевых производств, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», 394036, Воронежская обл., г. Воронеж, пр-т Революции, 19, e-mail: nadezhdastebunova@mail.ru

UDC 664+663.814

V. Ovsyannikov, N. Drannikova

STATUS AND PROSPECTS OF ULTRASONIC EXTRACTION OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES

Keywords: extraction, ultrasound, biologically active substances.

Abstract. The features of ultrasonic action on biotechnological raw materials of plant and animal origin during the extraction of useful components are considered. The mechanism of the energy impact on the raw material, the sound field solvent, as well as the influence of regime parameters on the main characteristics of the process, is described. The positive dynamics of the complex wave and diffusion effects on the nature and yield of biological substances from plant materials is shown. The performed studies on the extraction of rennet from crushed calf abomasum's showed an increase in the temperature of the sonicated medium by 13°C and a change in pH due to the formation of H⁺ and OH⁻ radicals due to cavitation. It has been established that during the first 4 minutes of sonicating a mixture of crushed calf abomasum's and a solvent, the pH value of the solution decreases slightly, and subsequently changes to the opposite after the 5th minute. This is followed by a second decline after 20 minutes and scoring. This phenomenon was explained by the formation of a significant amount of HCl free radicals within a microsecond sonication interval, after which a change in the reaction to the reverse was noted. The prospects for research in this area from the point of view of further improvement and development are shown.

References

1. Analysis of the factors affecting the efficiency of extraction of biologically active substances from agricultural raw materials by microwave extraction / V.Yu. Ovsyannikov, V.V. Toroptsev, S.A. Trunov, T.E. Shinkareva, M.A. Lobacheva // *Food security: scientific, personnel and information support: collection of scientific articles and reports based on materials of the VII International scientific and practical conference*. – Voronezh, 2021. – Pp. 166-169.
2. Fast method of ultrasonic extraction of Ginsenosides from vegetable raw materials and products based on ginseng for HPLC-MS/MS analysis / A.N. Stavrianidi, I.A. Rodin, A.V. Braun, O.A. Shpigun // *Analytics and control*. – 2013. – No. 17(4). – Pp. 459-464.

3. Influence of ultrasonic irradiation on the extraction of flavonoids from buckwheat green mass / A.V. Apaeva, E.T. Yamansarova, O.S. Kukovinets, O.B. Zvorygina // Bulletin of the Bashkir University. – 2016. – No. 21(1). – Pp. 69-72.
4. Dumitrash P.G., Bologa M.K., Shemyakova T.D. Ultrasonic extraction of biologically active compounds from tomato seeds // Electronic processing of materials. – 2016. – No. 52(3). – Pp. 47-52.
5. Zagorulko E.Yu., Teslev A.A., Ozhigova M.G. Development and optimization of technology for ultrasonic extraction of chamomile flowers (*Chamomillae Recutita flores*) // Pharmacy and Pharmacology. – 2018. – No. 6(2). – Pp. 151-166.
6. Rudometova N.V., Kim I.S. Study of the extraction of capsaicin from the fruits of hot peppers of the genus *Capsicum* // Scientific Journal of the ITMO Research University. Series "Processes and apparatuses of food production". – 2019. – No. 1. – Pp. 62-73.
7. Ultrasonic extraction and UV spectrophotometric determination of the amount of flavonoids and tannins in the aerial part of the blue cornflower / E.A. Podolina, M.A. Khanina, O.B. Rudakov, A.E. Nebolsin // Bulletin of the Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy. – 2018. – No. 2. – Pp. 28-35.
8. Shinkareva T.E., Ovsyannikov V.Yu. Microwave radiation as a factor in the intensification of the extraction process // New in technology and technology of functional foods based on medical and biological views: a collection of articles based on the materials of the IX International Scientific and Technical Conference. – Voronezh, 2021. – Pp. 505-508.
9. Bimakr M., Rahman R.A., Taip F.S., Adzahan N.M., Sarker Md.Z.I., Ganjloo A. Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Crude Oil from Winter Melon (*Benincasa hispida*) Seed Using Response Surface Methodology and Evaluation of Its Antioxidant Activity, Total Phenolic Content and Fatty Acid Composition // *Molecules*. 2012; 17(10):11748–11762. DOI: 10.3390/molecules171011748.
10. Cares M.G., Vargas Y., Gaete L., Sainz J., Alarcon J. Ultrasonically assisted Extraction of bioactive principles from *Quillaja Saponaria Molina* // *Physics Procedia*. – 2010. – No 3(1). – Pp. 169-178. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.01.024.
11. Ovsyannikov V.Yu., Drannikova N.E., Makeeva E.O. Features of ultrasonic action on protein media // *Problems of scientific thought*. – 2022. – Vol. 10. – No. 2. – Pp. 18-21.
12. Santos K.A., Gonçalves J.E., Cardozo-Filho L., da Silva E.A. Pressurized liquid and ultrasound-assisted extraction of α -bisabolol from candeia (*Eremanthus erythropappus*) wood // *Industrial Crops and Products*. – 2019. – No 130. – Pp. 428-435.
13. Segovia F.J., Corral-Pérez J.J., Almajano M.P. Avocado seed: Modeling extraction of bioactive compounds // *Industrial Crops and Products*. – 2016. – No 85. – Pp. 213-220.
14. Valeeva A.R., Makarova N.V., Valiulina D.F. Optimization of conditions for extracting bioactive compounds exhibiting antioxidant properties from hawthorn fruit (*Crataegus*) // *Proceedings of Universities Applied Chemistry and Biotechnology*. – 2019. – No 9(2). – Pp. 239-249.
15. Zengin G., Cvetanović A., Gašić U., Stupar A., Bulut G., Şenkardes I., Dogan A., Sinan K.I., Uysal S., Aumeeruddy-Elalfi Z., Aktumsek A., Mahomoodally M.F. Modern and traditional extraction techniques affect chemical composition and bioactivity of *Tanacetum parthenium* (L.) Sch.Bip // *Industrial Crops and Products*. – 2020. - 146: 112202.

Ovsyannikov Vitaliy – doctor of technical sciences, professor of the department of machines and apparatuses for food production, Voronezh State University of Engineering Technologies, 394036, Voronezh region, Voronezh, Revolution Avenue, 19, e-mail: ows2003@mail.ru

Drannikova Nadezhda – external student of the department of machines and apparatuses for food production, Voronezh State University of Engineering Technologies, 394036, Voronezh region, Voronezh, Revolution Avenue, 19, e-mail: nadezhdastebunova@mail.ru