

УДК 615.322

ОБЗОР МИРОВОГО ОПЫТА В ОБЛАСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

А.В. Сафина, В.В. Губернаторов, Р.Р. Хасаншин

Значительное количество биологически активных соединений и ценных компонентов содержится в различных видах растительного сырья, для эффективного извлечения которых требуются особые способы экстракции. В статье представлен обзор мирового опыта и результаты исследований зарубежных ученых в области оптимизации режимных параметров таких способов экстрагирования, как ультразвуковая, сверхкритическая и микроволновая экстракция, извлечение целевых компонентов под высоким давлением и напряжением. Проведенный анализ позволил выявить факторы, оказывающие влияние на эффективность процесса извлечения ценных компонентов. Ключевыми элементами успешного протекания процесса ультразвуковой экстракции являются используемый экстрагент, размер экстрагируемого материала, мощность и время ультразвука, продолжительность и температура протекания процесса. Рассмотренные многочисленные исследования свидетельствуют о перспективности сверхкритической экстракции растительных материалов, которая позволяет существенно увеличить выход извлекаемых соединений. Подбор типа основного экстрагента наряду с подбором условий извлечения является инструментом решения вопросов оптимизации методики сверхкритической экстракции. Преимущество микроволновой экстракции обуславливает высокая скорость процесса при небольшом расходе растворителя. При этом необходимо контролировать температуру, мощность микроволн и время экстракции, чтобы избежать разложения термочувствительных соединений. Определение оптимальных параметров процесса экстракции под давлением осуществляется для конкретного растительного материала с учетом подбора экстрагента для возможности растворения желаемых активных соединений. Наименее изученным является способ экстрагирования под напряжением вследствие сложности аппаратного оформления. При этом в исследованиях отмечено, что необходимо оптимизировать такие параметры, как напряжение электрического поля и время экстракции, чтобы обеспечить высокую степень разрушения клеточной стенки, не вызывая деградации активных соединений. Проведенный обзор отражает современное состояние и перспективы развития экстракционных технологий в разрезе мировых научных исследований, которые направлены на повышение количества и качества выхода экстрактивных веществ с наименьшими сырьевыми и энергетическими затратами.

Ключевые слова: экстракция, растительное сырье, способы экстрагирования, зарубежные исследования.

Введение

Непростая эпидемиологическая обстановка в мире обуславливает возросший интерес потенциальных потребителей к продуктам и медицинским препаратам, созданных на основе натурального растительного сырья. Это непосредственно связано с тем, что растительные компоненты и более безопасны, полезны и экологичны по отношению к искусственно синтезированным. На сегодняшний день многие производители стараются привлечь большее количество потребителей именно за счет использования природных органически соединений в своих продуктах, а также ведут активный поиск новых, которые заменят химически синтезированные. Многочисленные виды растений являются источниками содержания биологически активных веществ, в которые входят фенольные соединения, кислоты, флавоноиды, алкалоиды, полисахариды и эфирные масла [1-3]. Данные вещества применяются в различных отраслях промышленности, связанных с жизнедеятельностью организма человека, однако условия произрастания и способы экстрагирования напрямую влияют на качество и количество извлекаемых веществ [4].

Все ценные биологически активные компоненты растений содержатся внутри их растительной структуры, исходя из этого в каждом случае необходимо подбирать определенные способы извлечения тех или иных веществ. Оптимизация параметров процесса должна быть проведена для повышения эффективности экстракции, снижения потребления растворителей и затрачиваемой энергии [5,6]. Успешная практическая реализация того или иного способа экстракции растительного сырья невозможна

без фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований, учета существующего опыта разработки методов интенсификации экстракционных процессов, а также оптимизации и управления процессами экстракции [7].

В настоящее время отечественными исследователями накоплен значительный опыт извлечения биологически активных веществ из растительного сырья и применяются различные способы экстрагирования [8-10]. Однако для разработки современных методов и инструментов интенсификации экстракционных технологий необходимо учитывать опыт зарубежных исследователей, добившихся хороших результатов в вопросах повышения селективности извлечения ценных компонентов, оптимизации режимных параметров и создания высокоэффективных технологических схем и аппаратов.

Целью настоящего исследования является обзор мирового опыта и современных тенденций развития зарубежной практики в области оптимизации технологий извлечения ценных компонентов из растительного сырья.

Обзор зарубежных исследований в области извлечения целевых компонентов из растительных материалов

Ультразвуковая экстракция.

Одним из перспективных направлений модернизации процессов экстракции растительного сырья, является экстракция с применением ультразвука. Данный вид экстракции основан на процессе кавитации экстрагента, благодаря чему осуществляется разряжение внутри растительного материала и высвобождение экстрактивных веществ через экстрагент. Достаточно большое количество исследований показали, что применение ультразвука в классических экстракционных процессах позволяет интенсифицировать извлечения биологически активных веществ из самого растительного материала. Так, например, в работе [11] было установлено, что при экстракции активных соединений из оливковой выжимки применение ультразвука может быть более эффективно с точки зрения массо- и теплопередачи по отношению микроволновой и экстракции в аппарате Сокслета. Было также отмечено, что ультразвуковое воздействие позволяет повысить антиоксидантную активность получаемых веществ, а также спровоцировать выход специфических природных соединений.

В работе [12] провели сравнительный анализ классических способов извлечения экстрактивных веществ из *Elsholtzia ciliata* по отношению к ультразвуковому. Исследования показали, что экстракция с ультразвуком позволила не только увеличить выход и активность получаемых веществ, но и получить 13 новых фенольных соединений. Также были определены рациональные параметры ультразвуковой экстракции: в качестве экстрагента использовался 70% раствор этанола, выдержка осуществляется при 25 °С в течение 30 минут.

В работе [13] было проведено исследование влияния ультразвуковой экстракции на выход камптотецина из *Nothapodytes nimmoniana*. Установлено, что при этом увеличивается выход камптотецина до 78 % относительно 46,5 %, полученных классической экстракцией путем перемешивания. Также было отмечено, что данный вид экстракции позволил сократить временные и энергетические затраты, а также сократить количество используемого экстрагента. А в работе [14] проводилось исследование влияния интенсивности ультразвука на выделение камптотецина из *Nothapodytes nimmoniana*. Исследователи установили, что с повышением интенсивности ультразвука с 76,4 до 191 Вт/см² происходило повышение выхода камптотецина в 1,7 раз.

В работе [15] изучалось влияние классической водной экстракции и водной ультразвуковой экстракции на выход олеаноловой и урсоловой кислоты из листьев *Scutellaria barbata*. Исследования показали, что экстракция ультразвуком сократила временные и энергетические затраты, а также увеличила выход необходимых кислот. Оптимальными условиями предлагаемого способа экстракции являлись: мелкий объем экстрагируемых частиц (0,2-0,5 мм), гидромодуль 12:1 и выдержка материала в экстрагенте (60 % раствор этанола) в течение 25 минут, при постоянной температуре 55 °С.

В работе [16] исследовалось влияние ультразвуковой экстракции на выход свободных и связанных фенолов, а также β-глюкана из обезжиренных отрубей овса. Исследования показали, что ультразвуковая экстракция способствует сокращению временных затрат и высокому выходу свободных фенолов с высокой антиоксидантной активностью, по сравнению с классическим способом экстракции. Однако значительно понижается содержание связанных фенолов по сравнению с той же классической водной экстракцией. Более того, кинетика экстракции свободных фенольных соединений в обезжиренных овсяных отрубях была в большей степени улучшена за счет повышения температуры экстракции в то

время, как связанные фракции были уменьшены. Ультразвуковая экстракция позволила интенсифицировать процесс на начальной стадии, но дальнейшее влияние оказывали температура процесса и продолжительность выдержки в экстрагенте. И, все-таки экстракция с применением ультразвука позволила увеличить выход β -глюкана на 37 % относительно классического процесса настаивания.

В работе [17] осуществлялась подборка рациональных параметров ультразвуковой экстракции стевиозида из листьев *Stevia rebaudiana Bertoni*. Ультразвуковую экстракцию оптимизировали путем изменения различных параметров процесса и использования модели Пелега в качестве математического инструмента. Удалось установить, что максимальный выход стевиозида осуществлялся при следующих режимных параметрах: размер частиц растительного порошка - 0,075 мм, гидромодуль 1:30, в качестве экстрагента применялся глицерин, температура экстракции 70 °С, мощность ультразвука 200 Вт при частоте 20 кГц. Было установлено, что экстракция стевиозида с помощью ультразвука помогает достичь наибольшего выхода вещества относительно экстракции в аппарате Сокслета и классической мацерации, а данные, полученные экспериментальным путем, практически сопоставимы с расчетными.

В работе [18] осуществлялась оптимизация процесса ультразвуковой экстракции артемизинина из *Artemisia ánnua*. Содержание артемизина в экстрактах определяли с помощью метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), а для оптимизации процесса использовали методологию поверхностного отклика (RSM). В качестве точек использовались 3 независимые переменные: гидромодуль, температура протекания процесса и мощность ультразвука, которые оценивали с использованием экспериментального проекта Бокса-Бенкена. Прогнозируемый выход артемизинина составлял 0,7848 %, тогда как фактический выход в экстрактах составлял $0,7826 \% \pm 0,0790 \%$. Исходя из этого, удалось подобрать оптимальные параметры протекания процесса ультразвуковой экстракции: соотношение растворителя к материалу 42,71 мл/г, температура экстракции 41,86 °С, мощность ультразвука 120 Вт.

В работе [19] были подобраны рациональные параметры комбинированного способа экстракции биологически активных веществ из *Olea europaеа*, который включал в себя настаивание экстракта при периодическом воздействии на него микроволн и ультразвука. Исследования показали, что предлагаемый способ экстракции позволил увеличить выход экстрактивных веществ, однако усложнилась технология протекания самого процесса. В результате эксперимента были получены следующие параметры: концентрация этанола 90 %, температура экстракции 50 °С, время экстракции 5 мин, соотношение жидкости и твердого вещества 30 мл/г, интенсивность ультразвука 135,6 Вт/см² и частота ультразвука 60 кГц.

Из всего вышеперечисленного можно заключить, что ультразвуковая экстракция обладает рядом преимуществ, таких как простота исполнения, сокращение временных затрат и затрат экстрагента, достаточно неплохой выход биологически активных веществ и экологичность процесса. Для успешного протекания ультразвуковой экстракции необходимо учитывать следующие факторы: используемый экстрагент, экстрагируемый материал, мощность и время ультразвука, а также температура протекания процесса. Однако для исключения полного разрушения структуры экстрагируемого материала и образования избыточных гидроксильных радикалов, которые могут вызвать деградацию активных соединений, необходимо контролировать силу ультразвука.

Сверхкритическая жидкостная экстракция.

Экстракция при особых условиях (выше критических параметров температуры и давления) получила название «сверхкритическая флюидная экстракция» и в настоящее время является перспективной альтернативой обычным методам жидкостной экстракции. Когда вещество нагревается до температуры, превышающей его критическую температуру, и сжимается при давлении, превышающем его критическое давление, оно находится в сверхкритическом состоянии. Сверхкритическую жидкость нельзя отличить от жидкости или газа, так как она обладает низкой вязкостью, как газ, и высокой плотностью, как жидкость. Сверхкритическая жидкость может легко проникать в капилляры и поры растительных материалов, солиubilизировать активные соединения и переносить их в объем растворителя. В качестве экстрагента в основном используют диоксид углерода CO₂, так как он инертен, не горюч, нетоксичен, доступен и легко отделяется от сырьевого материала. Полученные экстракты имеют не высокий выход по сравнению с экстрактами, полученными по классическим технологиям, однако они отличаются большей чистотой извлекаемых веществ и высокой антиоксидантной активностью.

В работе [20] исследовалось влияние различных типов экстракции на извлечение масел из семян пойменных деревьев, произрастающих в лесах Амазонки. Масло получали двумя способами: сверхкритической экстракцией и экстракцией в аппарате Сокслета. Сверхкритическую экстракцию проводили при температуре 40, 60 и 80 °С, давлении 350 бар в течение 3,5 часов. Экстракцию в аппарате Сокслета проводили при температуре 55 °С в течение 4 часов с использованием петролейного эфира в качестве экстрагента. Проведенные исследования установили, что сверхкритическая экстракция диоксидом углерода, проводимая при температуре 80 °С, позволила увеличить выход масла из семян и улучшить его ингибирующую активность.

Сверхкритическая экстракция антиоксидантов из *Agave salmiana* анализировалась в работе [21]. Исследования установили, что повышение давления жидкости способствует более быстрому растворению CO₂, а повышение температуры экстракции выше 50 °С увеличивает скорость массопереноса, но уменьшает способность сольватации частиц. Также в работе [22] было установлено, что высокая температура сверхкритической экстракции оказывает негативное влияние на выход экстрактивных веществ при более низком давлении и положительное влияние - при более высоком давлении. А в работе [23] наилучшие показатели процесса извлечения биоактивных соединений из корня эфиопского растения *Rumex abyssinicus* (*mekmeko*) наблюдались при более высоком давлении и более низкой температуре.

В работе [24] было проведено исследование субкритической водной экстракции транс-ресвератрола и его гликозилированной формы – транс-пикеида, полученного из коры *Shorea roxburghii*. Результаты исследования показали, что сверхкритическая экстракция способствовала большему выходу транс-ресвератрола и транс-пикеида относительно классической экстракции в аппарате Сокслета. Также было отмечено что, с увеличением скорости потока и температуры количественное содержание данных веществ увеличилось и составляло 23,18 и 350,28 мкг/г сухого веса, соответственно. Были установлены рациональные параметры для успешного протекания процесса экстракции: температура экстракции 190 °С при скорости потока воды 3 мл/мин.

В работе [25] рассматривалось влияние сверхкритической экстракции CO₂ на выход эфирных масел из семян японского перца, кардамона и фенхеля, а также их активность. Полученные результаты были сопоставлены с классическими способами извлечения - гидродистилляция и экстракция в аппарате Сокслета. Результаты проведенных исследований показали, что в процессе сверхкритической экстракции наблюдается увеличение выхода и антирадикальной активности перца и кардамона в отличие от гидродистилляции и экстракции в аппарате Сокслета. Показатели активности семян фенхеля были ниже, но все же превышали показатели, полученные с помощью классических способов экстракции.

В работе [26] исследовалось влияние сверхкритической экстракции плодов *Schinus terebinthifolius* на его антипролиферативную активность. Исследования показали, что экстракты, полученные в диапазоне температур 50-60 °С не зависимо от давления, имели высокую антипролиферативную активность, препятствующую развитию раковой клетки почки с общим ингибированием роста <3,9 мкг/мл. Экстракты, полученные при давлении 200 бар и температуре экстракции 50 °С, были эффективны против опухоли яичников и предстательной железы. Исследования также показали, что с увеличением давления с 10 МПа до 30 МПа выход экстрактивных веществ увеличился с 3,08 % до 13,7 %.

В работе [27] было исследовано влияние предварительного холодного прессования бутонов гвоздики перед сверхкритической экстракцией. Исследования показали, что процесс подготовки сырьевого материала путем предварительного холодного прессования позволил увеличить выход четырех основных соединений, идентифицированных в экстрактах до 22,2%.

В работе [28] были получены оптимальные параметры сверхкритической экстракции *Folia salviae*: температура процесса 280 °С, поддерживаемая в течение 110 минут и 11 % концентрация этанола. Полученное масло имело высокое содержание сложных эфиров, кислот и фенолов, которые активно применяются в различных отраслях промышленности.

Сверхкритическая экстракция является одним из наиболее изучаемых и применяемых процессов экстракции растительного сырья, которая позволяет увеличить выход извлекаемых соединений. Основным недостатком данного способа является его непригодность для извлечения полярных соединений. Также следует отметить, что выход экстрактивных веществ может увеличиваться с повышением давления экстракции. Однако, это может привести к снижению селективности экстракта и содержанию различных примесей. Управление растворяющей способностью за счет плотности флюида

позволяет осуществлять селективное извлечение ценных компонентов и увеличивать диапазон выхода экстрактивных веществ.

Сверхвысокочастотная или микроволновая экстракция.

Микроволны – это электромагнитное излучение, несущее в себе огромное количество энергии, которое протекает в диапазоне длин волн от 1 мм до 1 м и частотой от 300 ГГц до 300 МГц. Микроволновый нагрев в сверхвысокочастотном поле обуславливает непрерывное выравнивание полярных молекул, таких как вода в соответствии с колеблющимся электромагнитным полем. Это дипольное вращение заставляет вращающиеся молекулы сталкиваться с соседними молекулами и передавать им энергию. В связи с чем, экстракция с помощью микроволнового излучения способна разрушать клеточную стенку растения и высвобождать активные соединения. На сегодняшний день по данной тематике проведено достаточно большое количество исследований, которые показали, что применение микроволнового излучения в процессе экстракции растительного сырья позволяет интенсифицировать процесс и сокращать временные затраты. Также было отмечено, что данный тип экстракции позволяет использовать меньшее количество экстрагента по сравнению с классическими способами [29, 30].

В работе [31] был проведен сравнительный анализ микроволновой, ультразвуковой и классической экстракции листьев *Eucalyptus globulus*. Проведенные исследования показали, что все экстракты практически сопоставимы по концентрации и содержанию биологически активных веществ, однако микроволновое излучение позволило сократить в 2 раза время экстракции относительно ультразвукового способа и в 4 раза относительно классического.

В работе [32] также проводились исследования влияния различных способов экстракции на извлечение экстрактивных веществ из кожуры лесного ореха. Экстракцию проводили классической мацерацией, с помощью ультразвука, сверхкритическим способом и с применением микроволнового излучения. Исследования показали, что микроволновая экстракция позволила за 6 минут извлечь экстрактивные вещества в объеме, равном при экстрагировании ультразвуком за 45 минут, сверхкритической экстракции – за 60 минут и 24 часа при классической мацерации. При этом было отмечено, что для протекания процесса микроволновой экстракции потребовалось меньшее количество экстрагента.

В работе [33] исследовалось влияние микроволнового излучения на выход экстрактивных веществ из шести видов тайских съедобных растений. Самый высокий выход фенолов наблюдался в экстракте из листьев *Caesalpinia mimosoides* (377,47 мг ГАЕ/г), а самое высокое содержание танинов в экстракте *Polygonum odoratum*, наибольшую антиоксидантную активность проявили экстракты, полученные из листьев *Careya arborea* (73,54 мм FeSO₄/100 г).

В работе [34] также было исследовано влияние микроволновой экстракции на различные виды растений, однако авторами были рассмотрены еще и условия произрастания. Установлено, что экстракты, полученные из *Thymus fontanesii* и привезенные из Макаронезии, имели повышенное содержание свободных фенолов в отличие от экстрактов, привезенных из северо-западной Африки. А экстракты из *Thapsia garganica*, собранные в Северной Африке и на Балеарских островах, имели достаточно значительные различия антиоксидантной активности.

Исследования по подбору экстрагента и его оптимального соотношения, что позволяло изменить диэлектрическую проницаемость и интенсифицировать микроволновую экстракцию, проводились в работе [35]. Установлено, что в качестве экстрагента целесообразно использовать этанол и чистый метанол. В работе [36] протестировали водный метанол и этанол для экстракции активных соединений из кожуры граната и пришли к выводу, что 50 %-ный этанол является наиболее подходящим растворителем для данного типа экстракции. Также было установлено, что разбавленный спирт способен извлекать активные соединения с более широким диапазоном полярности, в отличие от чистого.

В работе [37] было установлено, что увеличение мощности микроволнового излучения, а также времени экстракции способствовало увеличению выхода биологически активных веществ из *Hibiscus sabdariffa*. Также было отмечено, что увеличение мощности сверхвысокочастотного нагрева способствовало более высокой степени разрушения структуры растения при более низкой вязкости экстрагента.

Основными преимуществами сверхвысокочастотной или микроволновой экстракции являются короткое время экстракции и низкое потребление растворителя. Однако необходимо контролировать

температуру, мощность микроволн и время экстракции, чтобы избежать разложения термочувствительных соединений.

Экстракция под давлением.

При жидкостной экстракции под давлением растворители нагревают выше их атмосферных температур кипения и поддерживают под высоким давлением, чтобы они сохранялись в жидком состоянии, следовательно, растворители, используемые в экстракции под давлением, являются подкритическими жидкостями. Эти подкритические жидкости имеют пониженную вязкость и поверхностное натяжение, что позволяет им легче проникать в растительные материалы и растворять больше активных соединений. Когда в качестве растворителя используется вода, это называется экстракция подкритической жидкости. Обычно вода является полярным растворителем, который может извлекать различные полярные вещества. Однако вода в докритическом состоянии имеет пониженную диэлектрическую проницаемость, так что ее полярность становится аналогичной этанолу и метанолу. Это позволяет воде заменять органические растворители в качестве альтернативы для извлечения веществ с низкой полярностью.

В работах [38, 39] рассматривалось влияние экстракции под высоким давлением при извлечении активных соединений из различных растительных материалов. Проведенные исследования установили, что данный вид экстракции позволяет сократить временные затраты и получать вещества с высокими антиоксидантными характеристиками, сопоставимыми при получении сверхкритической флюидной экстракцией. Так же было отмечено, что экстракция под высоким давлением позволила получить экстракты с повышенным содержанием фенолов и танинов, относительно экстракции с применением ультразвука, микроволнового излучения и сверхкритической экстракции.

В другой работе [40] проводилась оценка эффективности экстракции различных веществ из кожуры *Feijoa (Acca sellowiana (O. Berg) Burret)*. Экстракцию проводили под высоким и низким давлением, в качестве сравнения была проведена экстракция в аппарате Сокслета. Исследования показали, что в процессе экстракции в аппарате Сокслета и экстракции под высоким давлением получены сопоставимые значения по выходу экстрактивных веществ. Однако, экстракция под высоким давлением позволила сократить временные затраты на 5 часов и увеличить содержание фенолов практически в 3 раза относительно классической экстракции.

Сравнительный анализ экстрактов, полученных из различных частей *Lupinus albescens* был проведен в работе [41]. Экстракты получали под высоким давлением с применением в качестве растворителя сверхкритического CO₂ (150, 200 и 250 бар и температуре 40, 50 и 60 °С, соответственно) и сжиженного нефтяного газа (15, 25 и 30 бар и температуре 25, 35 и 45 °С, соответственно). Проведенные исследования показали, что в зависимости от растворителя, температуры и давления экстракции изменялся и состав получаемых экстрактов. Однако наибольшее влияние оказывали части самого растения. Так, например, из корней был получен самый большой выход стигмастерола (50,8 %) и эргостерола (25,6 %) а из цветка всего 1,2 % обоих веществ. Проведенные исследования также позволили идентифицировать другие соединения, такие как тетракозанол, пентадекановая кислота и эйкозанол.

Анализ влияния различных экстрагентов на процесс экстракции *Cárrthamus tinctorius* под высоким давлением был проведен в работе [42]. В качестве экстрагентов использовались метанол, этанол и гексан. Было установлено, что этанол является наиболее эффективным растворителем, так как оказывает наибольшее влияние на структуры пор клеток, позволяя извлекать больше активных соединений.

В работе [43] исследовалось влияние давления (1-9 МПа) на экстракцию активных соединений из *Matricāria chamomilla* при 100 °С. Было установлено, что наиболее подходящими параметрами давлениями являются 3 и 4,5 МПа, так как полученные экстракты имели повышенное содержание фенолов и хорошие показатели антиоксидантной активности.

Влияние концентрации растворителя на выход экстрактивных веществ *Sinopodophyllum hexandrum* при экстрагировании под высоким давлением жидкости проанализировано в работе [44]. Исследования показали, что наилучшая концентрация должна осуществляться относительно каждого растительного сырьевого материала, а растворитель не должен быть слишком разбавленным, чтобы не допускать деградацию биологически активных веществ.

Процесс экстракции под высоким давлением позволяет увеличивать выход активных веществ из определенного вида растительных материалов. Для успешного протекания процесса экстракции необходимо учитывать: растворитель и его концентрацию, время и температуру процесса, применяемое

давление. При этом оптимальные параметры процесса необходимо подбирать под конкретный растительный материал. Экстрагенты должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить возможность растворения большого количества желаемых активных соединений.

Экстракция с помощью высокого напряжения.

Экстракция с помощью высокого напряжения предполагает, что к клеткам прикладываются импульсы высокого напряжения с очень коротким временем. Вследствие этого разрушаются липидные бислои клеточной мембраны, образуя временные поры, которые значительно увеличивают массообмен между внутренней и внешней частями клеток. Это явление известно, как электропорация. Исследования показали, что импульсное электрическое поле может усиливать извлечение активных соединений из растительного сырья.

В работе [45] исследовали процесс экстракции под высоким напряжением для извлечения активных соединений из апельсиновой выжимки. Проведенные исследования показали, что для разрушения клеточной стенки сырьевого материала и повышения выхода экстрактивных веществ требовалось достаточно длительное время настаивания. Однако, длительная экстракция вызывала образование озона и свободных радикалов, которые окисляли активные соединения и снижали выход экстракции. Увеличение напряжения позволило более интенсивнее разрушить клеточную стенку материала и, тем самым, ускорить процесс извлечения. При этом чрезмерное повышение напряжения экстракции также вызывало образование озона и свободных радикалов в экстрактах, а также препятствовало извлечению активных веществ. Исходя из этого были подобраны следующие рациональные параметры процесса: в качестве растворителя использовалась дистиллированная вода с растворенной до 1,5 % пектизированной кислотой, экстракцию проводили в течение 10 минут при поддержании постоянной температуры 25 °С и напряжения 18 кВ. Данные параметры позволили получить экстракты с высоким содержанием фенолов и показателями биологической активности.

В работе [46] исследовали влияние экстракции под высоким напряжением на выход биологически активных веществ из коричневого риса. В качестве оптимального растворителя был выбран 40 % раствор ацетона. Экстракцию проводили при температуре 20-23 °С, длительности импульса 100 мс повторяющегося с частотой 5 Гц. Исследования показали, что полная проницаемость структуры сырьевого материала наблюдалась при увеличении интенсивности электрического поля с 1 кВ/см до 2 кВ/см. Далее эффект не наблюдался. Было установлено, что экстракция под высоким напряжением позволила получить экстракты с высокими показателями антиоксидантной активности.

Интенсивность процесса экстракции из *Agaricus bisporus* под высоким напряжением исследовалась в работе [47]. Было установлено, что увеличение интенсивности электрического тока с 12,4 кВ/см до 38,4 кВ/см и частоты с 400 до 800 Гц позволило значительно повысить выход биологически активных веществ. Экстракты, полученные данным способом, имели очень высокую концентрацию свободных фенолов в отличие от экстрактов, полученных классическим настаиванием.

Система непрерывного высоковольтного электрического разряда, позволяющая получать активные соединения из кожуры граната, протестирована в работе [48]. Напряженность электрического поля регулировалась путем изменения расстояния между электродами. Исследования показали, что выход экстракции увеличивался при повышении напряженности электрического поля с 18 кВ/см до 30 кВ/см. Дальнейшее увеличение интенсивности с 30 кВ/см до 45 кВ/см привело к снижению выхода экстрактивных веществ, вероятно, из-за разрушения структур активных соединений. Порошок кожуры граната, растворенный в воде, пропускали через экстракционную камеру. При увеличении скорости потока толщина пограничного слоя уменьшалась и получался более высокий выход биологически активных веществ. Дальнейшее увеличение скорости потока уменьшало выход, поскольку скорость раствора была слишком высокой для достижения равновесия экстракции. Для растворения активных соединений необходим достаточный объем растворителя, но избыточный растворитель поглощает энергию из системы и снижает выход. Исходя из этого, оптимальными параметрами процесса считались: скорость потока 12 мл/мин, гидромодуль 35 мл/г, интенсивность тока 29 кВ/см при зазоре между электродами 3,1 мм.

Высоковольтное электрическое поле может быть использовано для разрушения структур растений за очень короткое время, чтобы способствовать высвобождению активных соединений. Следовательно, этот метод обладает потенциалом для улучшения извлечения активных соединений из различных растительных материалов. Основными факторами, которые необходимо учитывать при проектировании

высоковольтной экстракции, являются напряженность или напряжение электрического поля и время экстракции. Эти факторы должны быть оптимизированы, чтобы обеспечить высокую степень разрушения клеточной стенки, не вызывая деградации активных соединений. Также следует учитывать объем растворителя, скорость потока, частоту электрического поля и температуру экстракции. Как показал проведенный обзор, данный метод экстракции широко не изучен, вероятно, из-за его сложности и соображений безопасности.

Заключение

В работе рассмотрен мировой опыт и результаты исследований зарубежных ученых по вопросам интенсификации процессов экстракции растительного сырья и оптимизации режимных параметров. Проведенный обзор научных исследований свидетельствует об эффективности таких способов экстракции, как ультразвук, микроволновая экстракция, экстракция под высоким напряжением и давлением, которые позволяют существенно увеличить выход экстрактивных веществ с высокими показателями активности. Рассмотренные многочисленные исследования каждого из способов свидетельствуют о перспективности данных направлений.

Представленные способы экстрагирования во многом нацелены на эффективное разрушение структуры растения, позволяющие высвободить больше активных соединений из растительных матриц материала. Как показал проведенный анализ, одним из основных факторов, влияющих на эффективность процесса извлечения, является используемый экстрагент, так как он может способствовать наилучшему выделению того или иного вещества или разрушать непрочные соединения молекул.

Важную роль для успешного протекания процесса экстракции играют время выдержки и температура, так как время должно быть достаточным, чтобы экстрагировать большинство активных соединений из сырьевого материала, а температура не должна разрушать структуру и другие вещества относительно извлекаемых. Во многих современных исследованиях рассматривается влияние размера частиц на выход экстрактивных веществ из сырьевого материала. Исследования показали, что наибольший выход экстрактивных веществ наблюдался при использовании частиц сырья меньшего размера, однако слишком маленький размер частиц может образовать порошкообразную форму в виде осадка и не раствориться.

На сегодняшний день, не существует единого универсального способа экстракции растительного сырья, позволяющего в полной мере извлечь все необходимые биологически активные вещества из материала. Как правило, каждый способ экстракции нацелен на решение конкретной задачи в зависимости от назначения экстрактов и их дальнейших продуктов.

Обобщая вышеизложенное, можно утверждать, что, несомненно, опыт зарубежных ученых является полезным в общем направлении интенсификации процессов извлечения целевых компонентов из сырья растительного происхождения и решения задач по оптимизации экстракционных технологий.

Литература

1. Hosseini S. Effects of Plant Extracts and Bioactive Compounds on Attenuation of Bleomycin-Induced Pulmonary Fibrosis / S. Hosseini, M. Imenshahidi, H. Hosseinzadeh, G. Karimi // *Biomed. Pharmacother.* 2018, 107, 1454–1465. DOI: 10.1016/j.biopha.2018.08.111.
2. Сафин Р.Г. Обзор современных исследований в области извлечения биологически активных веществ из березового гриба чага для фармацевтических и пищевых отраслей промышленности / Р.Г. Сафин, В.В. Губернаторов, А.В. Сафина, М.В. Хузеев // *Деревообрабатывающая промышленность.* 2019. № 3. С. 93-103.
3. Губернаторов В.В. Применение чаги в медицине и биомедицинских технологиях / В.В. Губернаторов, Р.Р. Хасаншин, Р.Р. Сафин // В сборнике: Молодежь и XXI век - 2017. материалы VII Международной молодежной научной конференции: в 4 томах. 2017. С. 296-298.
4. Разумов Е.Ю. Влияние условий произрастания на качественные показатели чаги / Е.Ю. Разумов, Р.Р. Сафин, К.В. Саерова, В.В. Губернаторов, А.Е. Губернаторова // *Деревообрабатывающая промышленность.* 2018. № 2. С. 51-57.
5. Chemat F. Green Extraction of Natural Products. Origins, Current Status, and Future Challenges / F. Chemat, M. Abert-Vian, A. S. Fabiano-Tixier, J. Strube, L. Uhlenbrock, V. Gunjevic, G. Cravotto // *Trends Anal. Chem.* 2019, 118, 248–263. DOI: 10.1016/j.trac.2019.05.037.

6. Perin S. Green Process Intensification Techniques for Bio-Refinery / S. Perino, F. Chemat // *Curr. Opin. Food Sci.* 2019, 25, 8–13. DOI: 10.1016/j.cofs.2018.12.004.
7. Исмаилов Л.Ю. Обзор исследований в области интенсификации процессов экстракции растительного сырья / Л.Ю. Исмаилов, А.В. Сафина, // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2021. № 2. С. 85-101.
8. Гуськов А.А. Совершенствование технологии и технических средств экстрагирования растворимых веществ из растительного сырья / А.А. Гуськов // *Мичуринск-наукоград РФ*. – 2019. – С. 4-10.
9. Рудобашта С.П., Казуб В.Т., Кошкарова А.Г. Водное экстрагирование сырья под воздействием импульсного электрического поля высокой напряженности // *Агроинженерия*. 2016. - №4 (74). - С. 16-21.
10. Белокуров С.С., Флисюк Е.В., Наркевич И.А., Лужанин В.Г., Шилов С.В., Новикова К.О. Сравнительный анализ перспективных методов экстрагирования для получения извлечений из семян пажитника сенного // *Фармацевтическая технология*. 2019. - № 3 (8). - С. 49-55.
11. Rodsamran P. Extraction of Phenolic Compounds from Lime Peel Waste Using Ultrasonic -Assisted and Microwave-Assisted Extractions / P. Rodsamran, R. Sothornvit // *Food Biosci.* 2019, 28, 66–73. DOI: 10.1016/j.fbio.2019.01.017.
12. Pudziulyte L. Extraction Methods for Phenolic and Volatile Compounds Recovery from *Elsholtzia ciliata* Fresh and Dried Herbal Materials / L. Pudziulyte, V. Jakstas, L. Ivanauskas, A. Laukevicien, et all // *Crops Prod.* 2018, 120, 286–294. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.04.069.
13. Juarez J.A. New high intensity ultrasonic technology for food dehydra-tion/ J.A. Juarez, G.R. Corral, J.C. Moraleda, T.S. Yang // *Drying Technol.* – 1999. – 17. – P. 587-608.
14. Dhiraj M. Patil. Ultrasound-assisted rapid extraction and kinetic mod-elling of influential factors: Extraction of camptothecin from *Nothapodytes nimmoniana* plant / M. Patil Dhiraj, G. Akamanchi Krishnacharya // *Ultrasonics Sonochemistry Volume 37*. – July 2017, – Pages 582-591.
15. Yu-Chiao Y. Simultaneous extraction and quantitation of oleanolic acid and ursolic acid from *Scutellaria Barbata* D. don by ultrasound-assisted extraction and high-performance liquid chromatography / Yu-Chiao, Y., Ming-Chi Wei, Fan-Yu Lian // *Chemical Engineering Communications*. – 2014. Vol. 201. – Issue 4. – P. 482 - 500.
16. Chao Chen. Ultrasound-assisted extraction from defatted oat (*Avena sa-tiva* L.) bran to simultaneously enhance phenolic compounds and β -glucan contents: Compositional and kinetic studies / Chao Chen, Li Wang, Ren Wang, Xiaohu Luo, Yongfu Li, Juan Li, Yanan Li, Zhengxing Chen // *Journal of Food Engineering Volume 222*, - April 2018, Pages 1-10.
17. Morteza Rouhani Modeling and optimization of ultrasound-assisted green extraction and rapid HPTLC analysis of stevioside from *Stevia Rebaudiana* / *Industrial Crops and Products Volume 132*, June 2019, Pages 226 - 235.
18. Zhang H. Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Artemisinin from *Artemisia annua* L. by Response Surface Methodology / H. Zhang, L. Zhang, X. Hu, Y. Zhou, C.Ding, R. Yang, X.Wang, D. Li // *Separation Science and Technology*. – 2014. – Vol. 49. – Issue 5. – P. 673-681.
19. Xie P. Cheng J.Enhanced Extraction of Hydroxytyrosol, Maslinic Acid and Oleanolic Acid from Olive Pomace / P. Xie, L. Huang, C. Zhang, Y. Deng, X. Wang, J. Cheng // *Process Parameters, Kinetics and Thermodynamics, and Green-ness Assessment. Food Chem.* – 2019. – Vol. 276. – P. 662–674.
20. Cordeiro R.M. Supercritical CO2 extraction of ucuúba (*Virola surinamensis*) seed oil: global yield, kinetic data, fatty acid profile, and antimicrobial activities / R.M. Cordeiro, A.P. Silva, R.H. Pinto, W.A. Costa, S.H. Silva, W.B. Souza // *Chemical Engineering Communications*. – 2019. – Vol. 206. – Issue 1. – P. 86-97.
21. Santos-Zea L. Effect of ultrasound intensification on the supercritical fluid extraction of phytochemicals from *Agave salmiana* bagasse / L. Santos-Zea, J. A. Gutierrez-Uribe, J. Benedito // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2019. – Vol. 144. – P. 98–107.
22. Kavoura D. Supercritical CO2 extraction of *Salvia fruticosa* / D. Kavoura, K. Kyriakopoulou, G. Papaefstathiou, F. Spanidi, K. Gardikis, V. Louli // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2019. – Vol. 146. – P. 159-164.
23. Chainukool S. Subcritical water extraction of resveratrol from barks of *shorea roxburghii* / S. Chainukool, M. Goto, S. Hannongbua, A. Shotipruk // *Separation Science and Technology* . – 2014. – Vol. 49. – Issue 13. – P. 2073-2078.

24. Mumin E.L., Antiradical efficiency of essential oils from plant seeds obtained by supercritical CO₂, Soxhlet extraction, and hydrodistillation / E.L. Mumin, S. Machmudah, M. Goto // *Separation Science and Technology*. – 2012. – Vol. 48. – Issue 2. – P. 328–337.
25. Silva B.G. Supercritical carbon dioxide extraction of compounds from *Schinus terebinthifolius* Raddi Fruits: Effects of operating conditions on global yield, volatile compounds, and antiproliferative activity against human tumor cell lines / B.G. Silva, M.A. Foglio, A.L. T.G. Ruiz, P.T.V. Rosa // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2017. – Vol. 130. – P. 10–16.
26. Hatami T. Supercritical fluid extraction assisted by cold pressing from clove buds: Extraction performance, volatile oil composition, and economic evaluation / T. Hatami, J.C.F. Johner, G.L. Zobot, M.A.A. Meireles // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2019. – Vol. 144. – P. 39–47.
27. Akalin M.K. Sage oil extraction and optimization by response surface methodology / M. K. Akalin, K. Tekin, S. Karageoz // *Ind. Crops Prod.* – 2015. – Vol. 76. – P. 829–835.
28. Li J. Optimization of microwave-assisted extraction of triterpene saponins from defatted residue of yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge) kernel and evaluation of its antioxidant activity / J. Li, Y.-G. Zu, Y.-J. Fu, Y.-C. Yang, et al // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2010. – No. 11. – P. 637.
29. Ragnar M. pKa-values of Guaiacyl and Syringyl Phenols Related to Lignin / M. Ragnar, C.T. Lindgren, N.O. Nilvebrant // *Journal of Wood Chemistry and Technology*. – 2000. – Vol. 20.-I. 3. – P. 277–305.
30. Gullon B. Green approaches for the extraction of antioxidants from eucalyptus leaves / B. Gullon, A. Muniz-Mouro, T.A. Lu-Chau, M.T. Moreira; J.M. Lema, G. Eibes // *Industrial Crops and Products*. – 2019. Vol. 138. – P. 111 - 473.
31. Odabas H.I. Application of response surface methodology for optimizing the recovery of phenolic compounds from hazelnut skin using different extraction methods / H.I. Odabas // *Industrial Crops and Products*. – 2016. – Vol. 91. – P. 114–124.
32. Junsathian P. Biological and neuroprotective activity of Thai edible plant extracts / P. Junsathian, K. Yordtong, H. Corpuz, S. Katayama, S. Nakamura, S. Rawdkuen // *Industrial Crops and Products*. – 2018. – Vol. 124. – P. 548–554.
33. Nabet N. Optimization of Microwave-Assisted Extraction Recovery of Bioactive Compounds from *Origanum glandulosum* and *Thymus fontanesii* / N. Nabet, B. Gilbert-Lopez, K. Madani et al // *Ind. Crops Prod.* – 2019. P. 395–404.
34. Mustapa A.N. Microwave-Assisted Extraction of Polyphenols from *Clinacanthus nutans* Lindau Medicinal Plant: Energy Perspective and Kinetics Modeling / A.N. Mustapa, A. Martin, J. R. Gallego, R.B. Mato, M. Cocero, // *Chemical Engineering Processing: Process Intensification*. – 2015. – Vol. 97. – P. 66–74.
35. Kaderides K. Microwave-Assisted Extraction of Phenolics from Pomegranate Peels: Optimization, Kinetics, and Comparison with Ultrasound Extraction / K. Kaderides, L. Papaioikonomou, M. Serafim, A. Goula // *Chem. Eng. Process.* – 2019. – P. 1–11.
36. Pimentel-Moral S. Microwave-Assisted Extraction for *Hibiscus sabdariffa* Bioactive Compounds / S. Pimentel-Moral, I. Borrás-Linares, J. Lozano-Sanchez, et al // *Biomed.* – 2018. – P. 313–322.
37. Lama-Munoz A. Extraction of oleuropein and luteolin-7-O-glucoside from olive leaves: Optimization of technique and operating conditions / A. Lama-Munoz, M.M. Contreras, F. Espinola, M. Moya, A. Torres, I. Romero, E. Castro // *Food Chem.* – 2019. – Vol. 293. – P. 161–168.
38. Velickovic V. Application of conventional and non-conventional extraction approaches for extraction of *Erica carnea* L.: Chemical profile and biological activity of obtained extracts / V. Velickovic, S. Durovic, M. Radojkovic, A. Cvetanovic, J. Svarc-Gajic; J. Vujic, S. Trifunovic, P. Z. J. Maskovic // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2017. – Vol. 128. – P. 331–337.
39. Santos P.H. Extraction of Bioactive Compounds from Feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret) Peel by Low and High-Pressure Techniques / P.H. Santos, D.H. Ribeiro Baggio, G.A. Micke, L. Vitali, H.J. Hense // *Supercrit Fluid.* – 2019. – P. 219 – 227.
40. Confortin T.C. Extraction and Composition of Extracts Obtained from *Lupinus albus* using Supercritical Carbon Dioxide and Compressed Liquefied Petroleum Gas / T.C. Confortin, I. Todero, J. F. Soares, T. Brun et al // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2017. – Vol. 128. – P. 395–403.
41. Toubane A. Optimization of Accelerated Solvent Extraction of *Carthamus caeruleus* L. Evaluation of Antioxidant and Anti-Inflammatory Activity of Extracts / A. Toubane, S.A. Rezzoug, C. Besombes, K. Daoud // *Industrial Crops and Products*. – 2017. – Vol. 97. – P. 620–631.

42. Cvetanovic A. Subcritical water extraction as a cutting edge technology for the extraction of bioactive compounds from chamomile / A. Cvetanovic, J. Svarc-Gajic, Z. Zekovic, U. Gasic, Z. Tesic, G. Zengin, P. Maskovic, M.F. Mahomoodally, S. Durovic // Influence of Pressure on Chemical Composition and Bioactivity of Extracts. Food Chem. – 2018, – p. 266 - 389.

43. Wang Y. Green and Efficient Extraction of Podophyllotoxin from Sinopodophyllum hexandrum by Optimized Subcritical Water Extraction Combined with Macroporous Resin Enrichment/ Y. Wang, G. Zhang, X. Chi, S. Chen // Ind. Crops Prod. – 2018. – Vol. 121, – P. 267–276.

44. Shahram H. Taghian Dinani S. Influences of Electrohydrodynamic Time and Voltage on Extraction of Phenolic Compounds from Orange Pomace / H. Shahram, S. Dinani Taghian, // Lwt. – 2019. – Vol. 111. – P. 23–30.

45. Xue D. Pulsed Electric Field Extraction of Valuable Compounds from White Button Mushroom (Agaricus Bisporus) / D. Xue, M.M. Farid, // Innovative Food Science Emerging Technologies. – 2015. – Vol. 29. – P. 178–186.

46. Xi J. Continuous Extraction of Phenolic Compounds from Pomegranate Peel Using High Voltage Electrical Discharge / J. Xi, L. He, L. G. Yan // Food Chemistry. – 2017. – Vol. 230. – P. 354–361.

©Сафина А.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: alb_saf@mail.ru; Губернаторов В.В. – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: valera_gub@mail.ru; Хасаншин Р.Р. – д-р техн.наук, профессор кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: rusl2881@mail.ru.

UDC 615.322

OVERVIEW OF WORLD EXPERIENCE IN THE FIELD OF OPTIMIZATION OF EXTRACTION PROCESSES OF TARGET COMPONENTS FROM RAW MATERIALS OF PLANT ORIGIN

A.V. Safina, V.V. Gubernatorov, R.R. Khasanshin

A significant amount of biologically active compounds and valuable components are contained in various types of plant raw materials, for the effective extraction of which special extraction methods are required. The article presents an overview of world experience and the results of research by foreign scientists in the field of optimizing the operating parameters of such extraction methods as ultrasonic, supercritical and microwave extraction, extraction of target components under high pressure and voltage. The analysis made it possible to identify factors influencing the efficiency of the extraction process of valuable components. The key elements of the successful course of the ultrasonic extraction process are the extractant used, the size of the extracted material, the power and time of ultrasound, the duration and temperature of the process. The numerous studies reviewed indicate the prospects of supercritical extraction of plant materials, which can significantly increase the yield of extracted compounds. The selection of the type of the main extractant, along with the selection of extraction conditions, is a tool for solving issues of optimizing the supercritical extraction technique. The advantage of microwave extraction is due to the high speed of the process with a small consumption of solvent. At the same time, it is necessary to control the temperature, microwave power and extraction time in order to avoid decomposition of heat-sensitive compounds. Determination of the optimal parameters of the extraction process under pressure is carried out for a specific plant material, taking into account the selection of an extractant for the possibility of dissolving the desired active compounds. The least studied is the method of extraction under voltage due to the complexity of the hardware design. At the same time, studies have noted that it is necessary to optimize parameters such as the voltage of the electric field and the extraction time in order to ensure a high degree of destruction of the cell wall without causing degradation of active compounds. The review reflects the current state and prospects for the development of extraction technologies in the context of world scientific research, which are aimed at increasing the quantity and quality of extractive substances with the lowest raw materials and energy costs.

Keywords: extraction, plant raw materials, extraction methods, foreign research.

References

1. Hosseini S. Effects of Plant Extracts and Bioactive Compounds on Attenuation of Bleomycin-Induced Pulmonary Fibrosis / S. Hosseini, M. Imenshahidi, H. Hosseinzadeh, G. Karimi // *Biomed. Pharmacother.* 2018, 107, 1454–1465. DOI: 10.1016/j.biopha.2018.08.111.
2. Safin R.G., Gubernatorov V.V., Safina A.V., Khuzeev M.V. Obzor sovremennykh issledovaniy v oblasti izvlecheniya biologicheskii aktivnykh veshchestv iz berezovogo griba chaga dlya farmatsevticheskikh i pishchevykh otrasley promyshlennosti [Review of modern research in the field of extraction of biologically active substances from birch fungus chaga for pharmaceutical and food industries] // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. 2019. No. 3. pp. 93-103. (In Russ.).
3. Gubernatorov V.V., Khasanshin R.R., Safin R.R. Primeneniye chagi v meditsine i biomeditsinskikh tekhnologiyakh [The use of chaga in medicine and biomedical technologies] // [In the collection: Youth and the XXI century – 2017. materials of the VII International Youth Scientific Conference]. 2017. pp. 296-298. (In Russ.).
4. Razumov E.Yu., Safin R.R., Serova K.V., Gubernatorov V.V., Gubernatorova A.E. Vliyaniye usloviy proizrastaniya na kachestvennyye pokazateli chagi [The influence of growing conditions on the quality indicators of chaga] // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. 2018. No. 2. pp. 51-57. (In Russ.).
5. Chemat F Green Extraction of Natural Products. Origins, Current Status, and Future Challenges / F. Chemat, M. Abert-Vian, A. S. Fabiano-Tixier, J. Strube, L. Uhlenbrock, V. Gunjevic, G. Cravotto // *Trends Anal. Chem.* 2019, 118, 248–263. DOI: 10.1016/j.trac.2019.05.037.
6. Perin S. Green Process Intensification Techniques for Bio-Refinery / S. Perino, F. Chemat // *Curr. Opin. Food Sci.* 2019, 25, 8–13. DOI: 10.1016/j.cofs.2018.12.004.
7. Ismailov L.Yu., Safina A.V. Obzor issledovaniy v oblasti intensivifikatsii protsessov ekstraktsii rastitelnogo Syria [Review of research in the field of intensification of extraction processes of plant raw materials] // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. 2021. No. 2. pp. 85-101. (In Russ.).
8. Guskov A.A. Sovershenstvovaniye tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv ekstragirovaniya rastvorimykh veshchestv iz rastitelnogo syria [Improvement of technology and technical means of extraction of soluble substances from vegetable raw materials] // [Michurinsk-naukograd RF]. 2019. – pp. 4-10. (In Russ.).
9. Rudobashta S.P., Kazub V.T., Koshkarova A.G. Vodnoye ekstragirovaniye syria pod vozdeystviyem impulsnogo elektricheskogo polya vysokoy napryazhennosti [Water extraction of raw materials under the influence of a high-intensity pulsed electric field] // *Agroinzheneriya* [Agroengineering]. 2016. No. 4 (74). pp. 16-21. (In Russ.).
10. Belokurov S.S., Flisyuk E.V., Narkevich I.A., Luzhanin V.G., Shilov S.V., Novikova K.O. Sravnitelnyy analiz perspektivnykh metodov ekstragirovaniya dlya polucheniya izvlecheniy iz semyan pazhitnika sennogo [Comparative analysis of promising extraction methods for obtaining extracts from hay fenugreek seeds] // *Farmatsevticheskaya tekhnologiya* [Pharmaceutical technology]. 2019. Vol. 8.No. 3. pp. 49-55. (In Russ.).
11. Rodsamran P. Extraction of Phenolic Compounds from Lime Peel Waste Using Ultrasonic -Assisted and Microwave-Assisted Extractions / P. Rodsamran, R. Sothornvit // *Food Biosci.* 2019, 28, 66–73. DOI: 10.1016/j.fbio.2019.01.017.
12. Pudziuvelyte L. Extraction Methods for Phenolic and Volatile Compounds Recovery from *Elsholtzia ciliata* Fresh and Dried Herbal Materials / L. Pudziuvelyte, V. Jakstas, L. Ivanauskas, A. Laukevicien, et al // *Crops Prod.* 2018, 120, 286–294. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.04.069.
13. Juarez J.A. New high intensity ultrasonic technology for food dehydrat-ion/ J.A. Juarez, G.R. Corral, J.C. Moraleda, T.S. Yang // *Drying Technol.* – 1999. – 17. – P. 587-608.
14. Dhiraj M. Patil. Ultrasound-assisted rapid extraction and kinetic mod-elling of influential factors: Extraction of camptothecin from *Nothapodytes nimmoniana* plant / M. Patil Dhiraj, G. Akamanchi Krishnacharya // *Ultrasonics Sonochemistry* Volume 37. – July 2017, – pp. 582-591.
15. Yu-Chiao Y. Simultaneous extraction and quantitation of oleanolic acid and ursolic acid from *Scutellaria Barbata* D. don by ultrasound-assisted extraction and high-performance liquid chromatography / Yu-Chiao, Y., Ming-Chi Wei, Fan-Yu Lian // *Chemical Engineering Communications.* – 2014. Vol. 201. – Issue 4. – P. 482 - 500.
16. Chao Chen. Ultrasound-assisted extraction from defatted oat (*Avena sativa* L.) bran to simultaneously enhance phenolic compounds and β -glucan contents: Compositional and kinetic studies / Chao Chen, Li Wang,

Ren Wang, Xiaohu Luo, Yongfu Li, Juan Li, Yanan Li, Zhengxing Chen // *Journal of Food Engineering* Volume 222, - April 2018, Pages 1-10.

17. Morteza Rouhani Modeling and optimization of ultrasound-assisted green extraction and rapid HPTLC analysis of stevioside from *Stevia Rebaudiana* / *Industrial Crops and Products* Volume 132, June 2019, Pages 226 - 235.

18. Zhang H. Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Artemisinin from *Artemisia annua* L. by Response Surface Methodology / H. Zhang, L. Zhang, X. Hu, Y. Zhou, C. Ding, R. Yang, X. Wang, D. Li // *Separation Science and Technology*. – 2014. – Vol. 49. – Issue 5. – P. 673-681.

19. Xie P. Cheng J. Enhanced Extraction of Hydroxytyrosol, Maslinic Acid and Oleanolic Acid from Olive Pomace / P. Xie, L. Huang, C. Zhang, Y. Deng, X. Wang, J. Cheng // *Process Parameters, Kinetics and Thermodynamics, and Green-ness Assessment*. *Food Chem.* – 2019. – Vol. 276. – P. 662–674.

20. Cordeiro R.M. Supercritical CO₂ extraction of ucuúba (*Virola surinamensis*) seed oil: global yield, kinetic data, fatty acid profile, and antimicrobial activities / R.M. Cordeiro, A.P. Silva, R.H. Pinto, W.A. Costa, S.H. Silva, W.B. Souza // *Chemical Engineering Communications*. – 2019. – Vol. 206. – Issue 1. – P. 86-97.

21. Santos-Zea L. Effect of ultrasound intensification on the supercritical fluid extraction of phytochemicals from *Agave salmiana* bagasse / L. Santos-Zea, J. A. Gutierrez-Urbe, J. Benedito // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2019. – Vol. 144. – P. 98–107.

22. Kavoura D. Supercritical CO₂ extraction of *Salvia fruticosa* / D. Kavoura, K. Kyriakopoulou, G. Papaefstathiou, F. Spanidi, K. Gardikis, V. Louli // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2019. – Vol. 146. – P. 159-164.

23. Chainukool S. Subcritical water extraction of resveratrol from barks of *shorea roxburghii* / S. Chainukool, M. Goto, S. Hannongbua, A. Shotipruk // *Separation Science and Technology*. – 2014. – Vol. 49. – Issue 13. – P. 2073-2078.

24. Mumin E.L., Antiradical efficiency of essential oils from plant seeds obtained by supercritical CO₂, Soxhlet extraction, and hydrodistillation / E.L. Mumin, S. Machmudah, M. Goto // *Separation Science and Technology*. – 2012. – Vol. 48. – Issue 2. – P. 328-337.

25. Silva B.G. Supercritical carbon dioxide extraction of compounds from *Schinus terebinthifolius* Raddi Fruits: Effects of operating conditions on global yield, volatile compounds, and antiproliferative activity against human tumor cell lines / B.G. Silva, M.A. Foglio, A.L. T.G. Ruiz, P.T.V. Rosa // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2017. – Vol. 130. – P. 10–16.

26. Hatami T. Supercritical fluid extraction assisted by cold pressing from clove buds: Extraction performance, volatile oil composition, and economic evaluation / T. Hatami, J.C.F. Johner, G.L. Zabet, M.A.A. Meireles // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2019. – Vol. 144. – P. 39–47.

27. Akalın M.K. Sage oil extraction and optimization by response surface methodology / M. K. Akalın, K. Tekin, S. Karageoz // *Ind. Crops Prod.* – 2015. – Vol. 76. – P. 829–835.

28. Li J. Optimization of microwave-assisted extraction of triterpene saponins from defatted residue of yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge) kernel and evaluation of its antioxidant activity / J. Li, Y.-G. Zu, Y.-J. Fu, Y.-C. Yang, et al // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2010. – No. 11. – P. 637.

29. Ragnar M. pKa-values of Guaiacyl and Syringyl Phenols Related to Lignin / M. Ragnar, C.T. Lindgren, N.O. Nilvebrant // *Journal of Wood Chemistry and Technology*. – 2000. – Vol. 20.-I. 3. – P. 277-305.

30. Gullon B. Green approaches for the extraction of antioxidants from eucalyptus leaves / B. Gullon, A. Muniz-Mouro, T.A. Lu-Chau, M.T. Moreira; J.M. Lema, G. Eibes // *Industrial Crops and Products*. – 2019. Vol. 138. – P. 111 - 473.

31. Odabas H.I. Application of response surface methodology for optimizing the recovery of phenolic compounds from hazelnut skin using different extraction methods koca / H.I. Odabas // *Industrial Crops and Products*. – 2016. – Vol. 91. – P. 114–124.

32. Junsathian P. Biological and neuroprotective activity of Thai edible plant extracts / P. Junsathian, K. Yordtong, H. Corpuz, S. Katayama, S. Nakamura, S. Rawdkuen // *Industrial Crops and Products*. – 2018. – Vol. 124. – P. 548–554.

33. Nabet N. Optimization of Microwave-Assisted Extraction Recovery of Bioactive Compounds from *Origanum glandulosum* and *Thymus fontanesii* / N. Nabet, B. Gilbert-Lopez, K. Madani et al // *Ind. Crops Prod.* – 2019. P. 395–404.

34. Mustapa A.N. Microwave-Assisted Extraction of Polyphenols from *Clinacanthus nutans* Lindau Medicinal Plant: Energy Perspective and Kinetics Modeling / A.N. Mustapa, A. Martin, J. R. Gallego, R.B. Mato, M. Cocero, // *Chemical Engineering Processing: Process Intensification*. – 2015. – Vol. 97. – P. 66–74.
35. Kaderides K. Microwave-Assisted Extraction of Phenolics from Pomegranate Peels: Optimization, Kinetics, and Comparison with Ultrasound Extraction / K. Kaderides, L. Papaoikonomou, M. Serafim, A. Goula // *Chem. Eng. Process.* – 2019. – 137 – P.1–11.
36. Pimentel-Moral S. Microwave-Assisted Extraction for Hibiscus *sabdariffa* Bioactive Compounds / S. Pimentel-Moral, I. Borrás-Linares, J. Lozano-Sanchez, et al // *Biomed.* – 2018. – P. 313–322.
37. Lama-Munoz A. Extraction of oleuropein and luteolin-7-O-glucoside from olive leaves: Optimization of technique and operating conditions / A. Lama-Munoz, M.M. Contreras, F. Espinola, M. Moya, A. Torres, I. Romero, E. Castro // *Food Chem.* – 2019. – Vol. 293. – P. 161–168.
38. Velickovic V. Application of conventional and non-conventional extraction approaches for extraction of *Erica carnea* L.: Chemical profile and biological activity of obtained extracts / V. Velickovic, S. Durovic, M. Radojkovic, A. Cvetanovic, J. Svarc-Gajic; J. Vujic, S. Trifunovic, P. Z. J. Maskovic // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2017. – Vol. 128. – P. 331–337.
39. Santos P.H. Extraction of Bioactive Compounds from Feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret) Peel by Low and High-Pressure Techniques / P.H. Santos, D.H. Ribeiro Baggio, G.A. Micke, L. Vitali, H.J. Hense // *Supercrit Fluid.* – 2019. – P. 219 – 227.
40. Confortin T.C. Extraction and Composition of Extracts Obtained from *Lupinus albus* using Supercritical Carbon Dioxide and Compressed Liquefied Petroleum Gas / T.C. Confortin, I. Todero, J. F. Soares, T. Brun et al // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2017. – Vol. 128. – P. 395–403.
41. Toubane A. Optimization of Accelerated Solvent Extraction of *Carthamus Caeruleus* L. Evaluation of Antioxidant and Anti-Inflammatory Activity of Extracts / A. Toubane, S.A. Rezzoug, C. Besombes, K. Daoud // *Industrial Crops and Products*. – 2017. – Vol. 97. – P. 620–631.
42. Cvetanovic A. Subcritical water extraction as a cutting edge technology for the extraction of bioactive compounds from chamomile / A. Cvetanovic, J. Svarc-Gajic, Z. Zekovic, U. Gasic, Z. Tesic, G. Zengin, P. Maskovic, M.F. Mahomoodally, S. Durovic // *Influence of Pressure on Chemical Composition and Bioactivity of Extracts*. *Food Chem.* – 2018, – p. 266 - 389.
43. Wang Y. Green and Efficient Extraction of Podophyllotoxin from *Sinopodophyllum hexandrum* by Optimized Subcritical Water Extraction Combined with Macroporous Resin Enrichment/ Y. Wang, G. Zhang, X. Chi, S. Chen // *Ind. Crops Prod.* – 2018. – Vol. 121, – P. 267–276.
44. Quagliariello V. Effect of pulsed electric fields – assisted extraction on anti-inflammatory and cytotoxic activity of brown rice bioactive compounds / V. Quagliariello, R.V. Iaffaioli, M. Falcone, G. Ferrari et al // *Food Research International*. – 2016. – Vol. 87. – P. 115–124.
45. Xue D. Pulsed Electric Field Extraction of Valuable Compounds from White Button Mushroom (*Agaricus Bisporus*) / D. Xue, M.M. Farid, // *Innovative Food Science Emerging Technologies*. – 2015. – Vol. 29. – P. 178–186.
46. Xi J. Continuous Extraction of Phenolic Compounds from Pomegranate Peel Using High Voltage Electrical Discharge / J. Xi, L. He, L. G. Yan // *Food Chemistry*. – 2017. – Vol. 230. – pp. 354–361.

© **Safina A.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: alb_saf@mail.ru; **Gubernatorov V.V.** – PhD in Engineering sciences, Senior lecturer of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: valera_gub@mail.ru; **Khasanshin R.R.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: rusl2881@mail.ru.