

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 66.061.3

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-6-157-165

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ БИОАКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ФЛЮИДНЫМИ РАСТВОРИТЕЛЯМИ

Сабирова Л.Ю.¹, Яруллин Л.Ю.¹, Хабриев И.Ш.¹, Корепанова Я.Ю.¹,
Шинкевич Т.О.²

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
yarul.lenar@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследование процессов экстракции растительного сырья, обладающих широким спектром биологически активных свойств, сверхкритическим диоксидом углерода, используемым в качестве растворителя, а также с добавлением этанола, используемого в качестве соразтворителя, к сверхкритическому диоксиду углерода в соотношении 5% к общему расходу при температуре 313 К и давлении 30 МПа. *МЕТОДЫ.* Исследование процессов экстракции осуществлялось методом сверхкритической флюидной экстракции, являющимся эффективным и экологичным по сравнению с традиционными методами получения экстрактов. Экспериментальная установка, оснащенная двумя плунжерными насосами, позволила реализовать динамический метод экстракции, как сверхкритическим диоксидом углерода, так и диоксидом углерода с добавлением этанола. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Получены итоговые значения выхода экстракта для *Valeriana officinalis*, *Hypericum*, *Matricaria* и *Salvia* при температуре 313 К и давлении 30 МПа с использованием в качестве растворителя чистого диоксида углерода и смеси диоксид углерод/этанол. По результатам экспериментальных данных построены зависимости массового выхода экстракта от времени экстракции. Тем самым определена скорость экстракции каждого образца. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что для каждого из образцов растительного сырья использование сверхкритического диоксида углерода, модифицированного с этанолом в соотношении 95 и 5% соответственно, ведет к увеличению выхода экстракта. Это, в свою очередь, ведет к уменьшению энергетических затрат при реализации процесса экстракции предложенным методом в промышленных масштабах.

Ключевые слова: экстракция; растительные экстракты; сверхкритический диоксид углерода; энергосбережение; *Valeriana officinalis*; *Hypericum*; *Matricaria*; *Salvia*.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00 (Сверхкритические флюидные технологии в переработке полимеров (FZSG-2023-0007)) с использованием аналитического оборудования центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Для цитирования: Сабирова Л.Ю., Яруллин Л.Ю., Хабриев И.Ш., Корепанова Я.Ю., Шинкевич Т.О. Энергосберегающие аспекты процесса экстракции биоактивных соединений из растительного сырья сверхкритическими флюидными растворителями // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 157-165. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-157-165.

ENERGY-SAVING ASPECTS OF THE PROCESS OF EXTRACTION OF BIOACTIVE COMPOUNDS FROM PLANT RAW MATERIALS WITH SUPERCRITICAL FLUID SOLVENTS

Sabirova L.Yu.¹, Yarullin L.Yu.¹, Khabriev I.Sh.¹, Korepanova Ya.Yu.¹, Shinkevich T.O.²

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

yarul.lenar@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* Study of extraction processes of plant raw materials with a wide range of biologically active properties, supercritical carbon dioxide used as a solvent, as well as with the addition of ethanol, used as a co-solvent, to supercritical carbon dioxide in a ratio of 5% to the total consumption at a temperature of 313 K and pressure 30 MPa. *METHODS.* The study of extraction processes was carried out by the method of supercritical fluid extraction, which is effective and environmentally friendly compared to traditional methods for obtaining extracts. The experimental setup, equipped with two plunger pumps, allowed the implementation of a dynamic extraction method with both supercritical carbon dioxide and carbon dioxide with the addition of ethanol. *RESULTS.* The final extract yields were obtained for *Valeriana officinalis*, *Hypericum*, *Matricaria* and *Salvia* at a temperature of 313 K and a pressure of 30 MPa using pure carbon dioxide and a carbon dioxide/ethanol mixture as a solvent. Based on the results of experimental data, the dependence of the mass yield of the extract on the extraction time was plotted. This determines the extraction rate of each sample. *CONCLUSION.* The experimental data obtained indicate that for each of the samples of plant raw materials, the use of supercritical carbon dioxide modified with ethanol in a ratio of 95 and 5%, respectively, leads to an increase in the yield of the extract. This, in turn, leads to a reduction in energy costs when implementing the extraction process using the proposed method on an industrial scale.

Keywords: extraction; plant extracts; supercritical carbon dioxide; energy saving; *Valeriana officinalis*; *Hypericum*; *Matricaria*; *Salvia*.

Acknowledgments: The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment for the provision of public services (performance of work) dated December 29, 2022, no. 075-01508-23-00 (supercritical fluid technologies in polymer processing (FZSG-2023-0007)) using the analytical equipment of the Center for Collective Use "Nanomaterials and Nanotechnologists" of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Kazan National Research Technological University.

For citation: Sabirova L.Yu., Yarullin L.Yu., Khabriev I.Sh., Korepanova Ya.Yu., Shinkevich T.O. Energy-saving aspects of the process of extraction of bioactive compounds from plant raw materials with supercritical fluid solvents. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 157-165. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-157-165.

Введение (Introduction)

В современном мире большое внимание уделяется здоровому образу жизни и правильному питанию. Известно, что некоторые хронические заболевания – это следствие использования продуктов питания, содержащие различные пищевые добавки. Включение натуральных пищевых добавок в состав широкого спектра продуктов питания является одной из наиболее важных тенденций в современной пищевой промышленности [1-4]. Использование биологически активных компонентов из природных источников представляет интерес не только применительно к пищевым технологиям, но и в первую очередь к медицине, поскольку многочисленные научные исследования показывают и доказывают благоприятное влияние целевых молекул растительного сырья против широкого спектра заболеваний. Установлено, что многие биологические соединения, извлеченные из природных источников растительного происхождения, обладают широким спектром биологически активных свойств, такими как противомикробные, антибактериальные, противогрибковые, противовирусные, противовоспалительные, противоопухолевые и антиоксидантные.

Для достижения эффективного извлечения ценных компонентов представляющих биологический интерес необходимо соблюдать ряд условий, в которые, помимо анализа полученной пробы, также входит качественный и количественный сбор получаемых компонентов в экстрактах растительного сырья. Безусловно, стоит отметить то, что на качество получаемого экстракта влияют такие факторы как география собранного растительного материала, сезон сбора урожая, климат и экология. Кроме того, нарушение условий правильного сбора, хранения и подготовки также могут негативно повлиять на качество выделенных биологически активных веществ.

Качество экстрактов зависит не только от описанных выше факторов. Природа растворителя, тип экстракции, время проведения процесса экстракции, температура и соотношение растворителя к образцу влияют на количество и состав экстракта. Для правильного подбора растворителя необходимо принять во внимание количество экстрагируемых соединений, скорость экстракции и уровень токсичности.

Для выделения полезных биологических соединений из растительного сырья используются многочисленные химические и механические процессы, такие как экстракция растворителем и паровая дистилляция [5]. Обычные методы экстракции, такие как метод Сокслета и мацерация с использованием токсичных жидких растворителей (дихлорметан и метанол) требуют много времени и приводят к получению разбавленных экстрактов. Органические растворители имеют свою специфику и не всегда положительно сказывающуюся для полученных экстрактов. Во-первых, многие органические растворители не в полной мере обеспечивают извлечение полного комплекса биологически активных компонентов. Во-вторых, возникает проблема, связанная с разделением экстракта от остатков растворителя. Решение этой проблемы часто ведет к потере ценных компонентов на этапе разделения. Это связано с технологическими параметрами процесса разделения. Идеальный метод экстракции должен быть быстрым, обеспечивать количественное извлечение целевого растворенного вещества без разложения, а растворитель должен легко отделяться от растворенного вещества. Разработка альтернативных экологически привлекательных методов экстракции с меньшими затратами энергии, с использованием безопасных растворителей и обеспечивающих получение безопасных и высококачественных экстрактов является, безусловно, актуальной задачей.

В последние годы инновационным и перспективным направлением для повышения качества производимой продукции, энергосберегающего характера технологического процесса и экологической безопасности является использование сверхкритических флюидных сред в различных отраслях [6-13], и в том числе в рамках переработки и экстракции растительного сырья.

Предположение об энергосберегающем характере сверхкритического флюидного экстракционного процесса основывается на сравнении величины работы, затрачиваемой на получение сверхкритического флюидного состояния с традиционным подходом – величиной энергопотребления на этапе, например, регенерации, но связанной в этом случае с испарением органического растворителя в процессе дистилляции. К примеру, работа сжатия диоксида углерода в диапазоне давлений от 6 до 20 МПа составляет 54 кДж/кг, тогда как при 293 К и давлении насыщения теплота парообразования жидких диоксида углерода, хладона-11, аммиака и изобутана равна соответственно 155,20; 183,17; 1189,0 и 335,7 кДж/кг [14]. Энергосберегающий характер сверхкритического флюидного экстракционного процесса в рамках подобной оценки очевиден.

Одним из эффективных путей технико-экономической оптимизации сверхкритических экстракционных технологий является модификация сверхкритических флюидных растворителей посредством добавления к ним ограниченного количества (до 15%; ещё чаще от 0,1 до 5,0%) сорастворителя, выполняющего функции модификатора и формирующей или усиливающей селективность процесса экстракции. В подавляющем большинстве случаев роль сорастворителя заключается в увеличении растворимости того или иного вещества, а также усилении зависимости последней от параметров состояния. И то, и другое способствует снижению рабочих давлений и температур, а вместе с этим и энергозатрат на осуществление процесса.

Привлекательность метода сверхкритической флюидной (СКФ) экстракции заключается в использовании небольшого количества растворителя по сравнению с традиционными методами и проведении процесса при низких энергетических затратах [15].

Сверхкритическая флюидная экстракция диоксидом углерода представляется более привлекательным по сравнению с другими растворителями, поскольку диоксид

углерода является инертным, дешевым, нетоксичным и экологически чистым растворителем. Критическая температура диоксида углерода 304,1 К, а критическое давление 7,38 МПа. Эти условия позволяют проводить экстракцию при низких температурах и сравнительно низких давлениях, что, в свою очередь, позволяет избежать термического разложения получаемого экстракта. Кроме этого, диоксид углерода без внешнего воздействия легко испаряется из получаемого экстракта.

Цель исследований в данной работе заключается в получении экстрактов растительного сырья как с чистым диоксидом углерода в сверхкритическом состоянии при параметрах $T = 313$ К и $P = 30$ МПа, так и с добавлением этанола к сверхкритическому диоксиду углерода при тех же параметрах. Сравнение полученных экспериментальных данных.

Практическая значимость исследований в рамках данной работы заключается в разработке нового комплексного подхода по экстракции биоактивных соединений из растительного сырья с использованием сверхкритических флюидных технологий.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве объектов исследования в рамках данной работы по экстракции использовали корень валерианы (*лат. Valeriana officinalis*), зверобой (*лат. Hypericum*), ромашка (*лат. Matricaria*) и шалфей (*лат. Salvia*). Все эти растения обладают широким спектром лечебных свойств и могут использоваться для профилактики различных заболеваний.

В качестве сверхкритического флюидного растворителя использовали диоксид углерода (CO_2) с чистотой 99,0 % и в качестве дополнительного сорастворителя этанол с чистотой 98%.

Экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 1, помимо баллона (1) с CO_2 , состояла из следующих основных узлов. Система создания и поддержания давления включала в себя плунжерный насос для CO_2 (2). Сжатие жидкого CO_2 происходило в двух рабочих камерах насоса, по этой причине к камерам по специальным гибким трубкам подводилась охлаждающая жидкость из холодильника (11). В качестве охлаждающей жидкости использовался тосол. В холодильнике задавалась температура охлаждения тосола до 268 К. Такой температуры было достаточно для перевода CO_2 в жидкое состояние.

При необходимости добавления дополнительных сорастворителей к основному растворителю – CO_2 в процессе экстракции, применялся плунжерный насос (3). В настоящей работе в качестве дополнительного сорастворителя использовали этанол в соотношении 5% к общему расходу потока CO_2 . Каждый из насосов оснащался электронной системой управления, позволяющей задавать расход потока как CO_2 , так и этанола. Это позволяло с высокой точностью установить процентное соотношение между ними. Расход CO_2 в процессе проведения эксперимента задавался 10 гр/мин. При использовании этанола расход составлял 0,5 гр/мин.

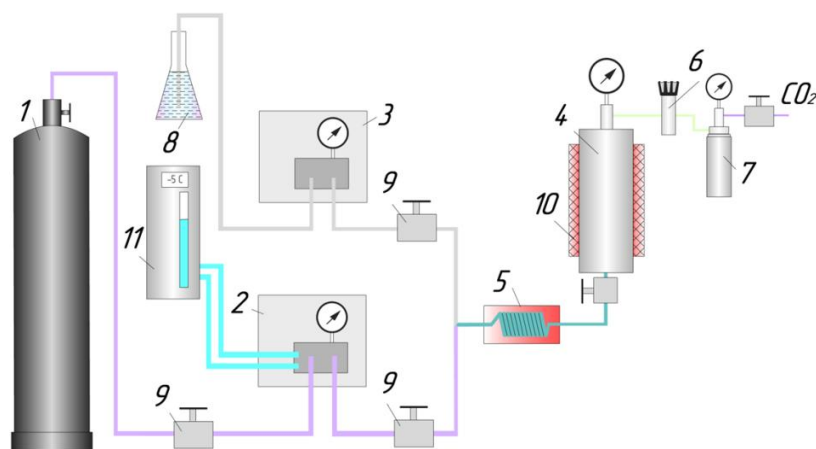


Рис. 1. Схема экспериментальной экстракционной установки: 1 – баллон CO_2 ; 2 – насос для CO_2 ; 3 – насос для сорастворителя; 4 – экстракционный сосуд; 5 – теплообменник; 6 – регулятор давления; 7 – сепаратор; 8 – емкость с сорастворителем; 9 – вентили высокого давления; 10 – нагревательная рубашка; 11 – холодильник

Fig. 1. Scheme of the experimental extraction installation: 1 – CO_2 cylinder; 2 – pump for CO_2 ; 3 – pump for co-solvent; 4 – extraction vessel; 5 – heat exchanger; 6 – pressure regulator; 7 – separator; 8 – container with co-solvent; 9 – high pressure valves; 10 – heating jacket; 11 – refrigerator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Объекты исследований помещались в экстрактор (4) объемом 1 литр. Известно, что интенсивность процесса экстракции зависит от степени измельчения исходного сырья. В связи с этим, перед проведением экспериментов, сырье размалывали на лабораторной мельнице до фракций размером 0,2-2 мм. Перед загрузкой измельченное сырье взвешивали на электронных весах. Экстрактор оснащался специальными микронными фильтрами для предотвращения механического уноса исследуемых образцов растительного сырья в процессе экстракции.

Нагрев потока CO_2 , либо потока CO_2 с этанолом, поступающего в экстрактор с исследуемым сырьем, предварительно нагревался теплообменником (5). Для поддержания необходимой температуры процесса экстракции, экстрактор был оснащен нагревательной рубашкой (10). Поддержание и сброс давления в экстракторе осуществлялось регулятором давления (6).

После регулятора давления поток CO_2 с извлеченным экстрактом, либо поток CO_2 с этанолом и извлеченным экстрактом поступал в сепаратор (7), в котором происходило разделение экстракта от растворителя за счет снижения давления и температуры. Давление в сепараторе в процессе экстракции поддерживалось в диапазоне 0,5 до 0,7 МПа., а температура составляла 298 К. После проведения эксперимента давление в сепараторе сбрасывали до атмосферного. Извлеченный из сепаратора экстракт взвешивали на электронных весах.

Результаты и обсуждения (Results and Discussions)

С изменением температуры и давления растворяющая способность сверхкритического CO_2 меняется и это безусловно влияет на конечный выход той или иной компоненты. Выбор параметров экстракции (температуры и давления) в основном исходит от содержания целевых компонентов исследуемого сырья. Основной диапазон температур, при котором проводят экстракцию диоксидом углерода от 308 до 333 К, в редких случаях используют температуру выше этого интервала. Проведение экстракции при более высоких температурах может негативно сказаться на полученном экстракте, т.е. есть вероятность разрушения и потери фармакологической активности веществ под действием высокой температуры. В настоящей работе экстракции проводили при температуре 313 К., эта температура считается наиболее предпочтительной для осуществления экстракции большинства видов растительного сырья сверхкритическим CO_2 .

Повышение давления до определенного значения ведет к повышению растворяющей способности и соответственно улучшению выхода экстракта, однако более высокое давление не всегда положительно сказывается на экстракции, так как более высокая сольватирующая способность снижает селективность растворителя. В связи с этим в данной работе экспериментальное давление составляло 30 МПа.

Дополнительным фактором, позволяющим повысить выход экстракта, является использование различных соразтворителей в процессе СКФ экстракции. Наиболее часто используемым соразтворителем в процессах экстракции растительного сырья являются этанол. Этот растворитель в основном используется в качестве соразтворителя для изменения полярности сверхкритического флюида и повышения его сольватирующей способности по отношению к целевым биологически активным соединениям.

В результате проведения экспериментов по экстракции чистым CO_2 и CO_2 с добавлением этанола 5% массовых от общего расхода получены экстракты *Valeriana officinalis*, *Hypericum*, *Matricaria* и *Salvia*. Каждый из полученных экстрактов имеет свой цвет и специфичный запах характерный для каждого исследуемого образца. На рисунке 2 представлена фотография образцов экстрактов.



Рис. 2. Фотография полученных экстрактов (слева на право): шалфея (*Salvia*); зверобоя (*Hypericum*); валериана (*Valeriana officinalis*); ромашки (*Matricaria*)

Fig. 2. Photo of the obtained extracts (from left to right): *Salvia*; *Hypericum*; *Valeriana officinalis*; *Matricaria*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Новые экспериментальные данные представляют собой зависимость выхода экстракта в процентах от времени проведения экстракции. В таблице 1 приведены итоговые значения выхода экстракта для *Valeriana officinalis*, *Hypericum*, *Matricaria* и *Salvia* при температуре 313 К и давлении 30 МПа с использованием в качестве растворителя чистого CO₂ и смеси CO₂/этанол.

Для каждого из образцов, как видно из данных, использование CO₂ модифицированного с этанолом в соотношении 95 и 5% соответственно ведет к увеличению выхода экстракта. Например, для *Hypericum* использование этанола в качестве сорастворителя позволило увеличить выход с 4,8% до 6,5%. Для *Valeriana officinalis* эта разница не столь очевидна, вероятно, это связано с элементарным составом сырья, в котором преобладают компоненты слаборастворимые в этаноле.

Таблица 1

Экспериментальные данные СКФ экстракции			
сырье	параметры эксперимента	растворитель	выход экстракта, %
шалфей (<i>Salvia</i>)	Т = 313 К; Р = 30 МПа	CO ₂ (100%)	7,1
ромашка (<i>Matricaria</i>)		CO ₂ (95 %) + этанол (5%)	8,3
		CO ₂ (100%)	4,5
зверобой (<i>Hypericum</i>)		CO ₂ (95 %) + этанол (5%)	5,5
		CO ₂ (100%)	4,8
корень валериана (<i>Valeriana officinalis</i>)		CO ₂ (95 %) + этанол (5%)	6,5
		CO ₂ (100%)	2,4
		CO ₂ (95 %) + этанол (5%)	2,7

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Динамика выход экстракта связана со скоростью извлечения компонентов из растительного сырья. Как видно из рисунка 3, экстракция начинается быстро (в течение 200 мин), а затем следует область, в которой выход экстракта стабилизируется и, в конце концов, выходит на стационар. Для *Hypericum*, *Matricaria* и *Salvia*, начальный период быстрой экстракции легкодоступных растворенных веществ можно легко отличить от заключительного периода с гораздо более медленной экстракцией. Для *Valeriana officinalis* скорость экстракции меняется не так очевидно как у других исследуемых образцов и по этой причине экстракция проводилась в течение 10 часов для получения итоговых данных выхода экстракта.

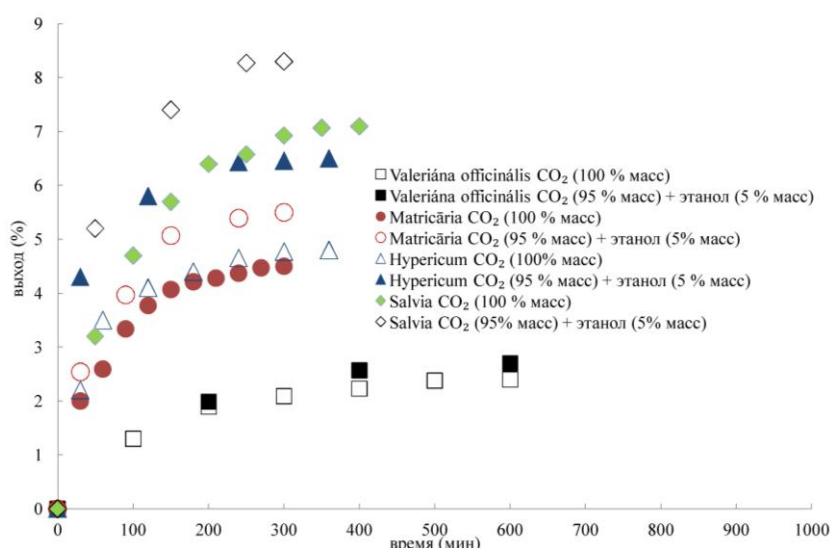


Рис. 3. Зависимость выход экстракта от времени эксперимента Fig. 3. Dependence of extract yield on experiment time

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Подтверждение факта энергосбережения можно подкрепить показателями реального технологического процесса. Согласно расчетам, проведенным в работе [16] при классическом способе экстракции (ремацерация) количество тепла, затрачиваемое на проведение процесса, составляет 0,347 Гкал, при водно-вакуумной экстракции – 0,106 Гкал. В случае СКФ экстракции, предложенной в данной работе, для получения 1 кг

экстракта необходимо 0,043 Гкал (из них на нагрев – 0,009 Гкал, на сжатие CO_2 – 0,034 Гкал). В случае классической экстракции все затраты энергии в виде тепла расходуются на нагрев и выпаривание растворителя (воды): нагрев 1 тонны воды до 80 °С и выпаривание половины её массы. В случае СКФ экстракции затраты энергии включают нагрев диоксида углерода (0,009 Гкал характеризует количество электрической энергии, затрачиваемой электронагревателями на нагрев диоксида углерода за 1 цикл (10 часов)), а также работу насоса, осуществляющего сжатие и циркуляцию диоксида углерода (0,034 Гкал – суммарная величина электрической энергии, затрачиваемой насосом, также за 1 цикл).

Калории в качестве размерности энергетических затрат СКФ экстракции выбраны осознанно для возможности наглядно сравнить величины затрат разных методов.

Заключение (Conclusions)

По результатам проведенных исследований получены новые экспериментальные данные по экстракции *Valeriana officinalis*, *Hypericum*, *Matricaria*, *Salvia* сверхкритическим CO_2 , а также с использованием сверхкритического CO_2 , модифицированного с этанолом в соотношении 95 и 5%.

Итоговые значения массового выхода экстракта для всех исследуемых видов растительного сырья свидетельствуют о том, что для каждого из образцов использование сверхкритического диоксида углерода, модифицированного этанолом в соотношении 95 и 5% соответственно, ведет к увеличению выхода экстракта. Таким образом, можно сделать вывод, что использование соразтворителей, в частности этанола, при экстракции растительного сырья сверхкритическим диоксидом углерода ведет к уменьшению энергетических затрат при реализации процесса СКФ экстракции в промышленных масштабах, что безусловно является еще одним достоинством использования сверхкритических флюидных технологий в пищевой и фармацевтической промышленности.

Литература

1. Perrut M., Perrut V. Supercritical fluid applications in the food industry // *Gases in Agro-Food Processes*. 2019. pp. 483–509.
2. Zhou J., Gullón B., Wang M., Gullón P., Lorenzo J. M., Barba F. J. The Application of Supercritical Fluids Technology to Recover Healthy Valuable Compounds from Marine and Agricultural Food Processing By-Products: A Review // *Processes*, 2021. Vol. 9. № 2.
3. Majid A., Naz F., Phull A.R., Abbasi S., Khaskheli A.H., Sirohi M.H., Ahmed I., Ahmed W., Narejo G.F. Extraction and quantification of tocopherols from edible oils using high performance liquid chromatography // *International Journal of Biosciences*. 2019. Vol. 14. № 4. pp. 181-187.
4. Martinez J.L., editor. Supercritical Fluid Extraction of Nutraceuticals and Bioactive Compounds. CRC Press. 2008. 383 p.
5. Shirsath S., Sonawane S., Gogate P. Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations – a review of current status // *Chem Eng Proc Proc Intens*. 2012. Vol. 53. pp. 10–13.
6. Paulaitis M.E., Penninger J.M.L., Gray R.D., Davidson P. Chemical engineering at supercritical fluid conditions. Ann. Arbor Science Publishers. 1983. 543p.
7. Uwineza P. A., Waskiewicz A. Recent Advances in Supercritical Fluid Extraction of Natural Bioactive Compounds from Natural Plant Materials // *Molecules*. 2020. Vol. 25. № 17.
8. Kubra O., Yuksel B., Salih K., Ayse K., Osman S. Extraction of bioactive compounds from saffron species // *Saffron*. 2021. pp. 99-141.
9. Хайрутдинов В.Ф., Гумеров Ф.М. Нефтяные шламы и битуминозный песчаник как важный источник нефтепродуктов и проблемный экологический фактор // *Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2017. Т.19. № 3-4. С. 10-19.
10. Хазипов М.Р., Сагдеев К.А., Сагдеев А.А., Галимова А.Т., Хайрутдинов В.Ф., Гумеров Ф.М. Регенерация ионнообменного катализатора с использованием сверхкритического флюидного экстракционного процесса // *Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 111-112.
11. Мазанов С.В., Гумеров Ф.М., Усманов Р.А., Габитова А.Р., Зарипов З.И., Варфоломеев С.Д., Вольева В.Б., Шаповалов Ю.А. Биодизельное топливо. Часть I. Способы получения // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т.24. № 4. С. 16-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-16-49.
12. Мазанов С.В., Зарипов З.И., Гумеров Ф.М., Усманов Р.А., Шаповалов Ю.А. Биодизельное топливо. ЧАСТЬ II. теплофизические свойства систем, участвующих в процессе получения биодизельного топлива с использованием рабочих сред в сверхкритическом флюидном состоянии // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т.24. № 5. С. 35-60. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-35-60.

13. Мазанов С.В., Гумеров Ф.М., Курдюков А.И., Габитова А.Р., Усманов Р.А., Сафиуллина Л.Х., Зарипов З.И., Шаповалов Ю.А. Биодизельное топливо. Часть III. Квантово-химическое исследование и моделирование процесса // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 24-44. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-24-44.

14. Банашек В.Э., Бугаева О.П., Солодков В.В. и др. Экстракция липидов из растительного и микробиологического сырья сжиженными и сжатыми газами. Обзорная информация. 1989. Вып. 5. 36с.

15. Liza M.S, Abdul Rahman R.A, Mandana B, Jinap S, Rahmat A, Zaidul I, Hamid A. Supercritical carbon dioxide extraction of bioactive flavonoid from *Strobilanthes crispus* (Pecah Kaca) // Food Bioprod Process. 2010. Vol. 88. pp. 319–326.

16. Губернаторов В.В., Сафина А.В. Водно-вакуумная экстракция березового гриба чага. Казань: Издательство РИЦ Школа, 2022. 130 с.

Авторы публикации

Сабирова Людмила Юрьевна – аспирант кафедры ТОТ, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Яруллин Ленар Юлдашевич – канд. техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет. E-mail: yarul.lenar@gmail.com.

Хабриев Ильнар Шамилович – канд. техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Корепанова Ярослава Юрьевна – магистр кафедры ТОТ, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Шинкевич Татьяна Олеговна – канд. техн. наук, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Perrut M., Perrut V. Supercritical fluid applications in the food industry // Gases in Agro-Food Processes. 2019. pp. 483–509.

2. Zhou J., Gullón B., Wang M., Gullón P., Lorenzo J. M., Barba F. J. The Application of Supercritical Fluids Technology to Recover Healthy Valuable Compounds from Marine and Agricultural Food Processing By-Products: A Review // Processes, 2021. Vol. 9. № 2.

3. Majid A., Naz F., Phull A.R., Abbasi S., Khaskheli A.H., Sirohi M.H., Ahmed I., Ahmed W., Narejo G.F. Extraction and quantification of tocopherols from edible oils using high performance liquid chromatography // International Journal of Biosciences. 2019. Vol. 14. № 4. pp. 181-187.

4. Martinez J.L., editor. Supercritical Fluid Extraction of Nutraceuticals and Bioactive Compounds. CRC Press. 2008. 383 p.

5. Shirsath S., Sonawane S., Gogate P. Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations – a review of current status // Chem Eng Proc Proc Intens. 2012. Vol. 53. pp. 10–13.

6. Paulaitis M.E., Penninger J.M.L., Gray R.D., Davidson P. Chemical engineering at supercritical fluid conditions. Ann. Arbor Science Publishers. 1983. 543p

7. Uwineza P. A., Waśkiewicz A. Recent Advances in Supercritical Fluid Extraction of Natural Bioactive Compounds from Natural Plant Materials // Molecules. 2020. Vol. 25. №. 17.

8. Kubra O., Yuksel B., Salih K., Ayse K., Osman S. Extraction of bioactive compounds from saffron species // Saffron. 2021. pp. 99-141.

9. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M. Neftyanye shlamy i bityminozney peshhanik kak vazhnyi istotschnik nefteproduktov i problemnyi ekologitscheskiy faktor // Izvestiya vyzov. Problem Energetiki. 2017. T.19. №3-4. С. 10-19.

10. Hazipov M.R., Sagdeev K.A., Sagdeeva A.A., Galimov A.T., Khairutdinov V.F., Gumerov F.M. Peregneraciya ionnoobmennogo katalizatora s ispolzovaniem sverhkpitscheskogo flyuidnogo ekstrakcionnogo procesa // Izvestiya vyzov. Problem Energetiki. 2018. T.20. №1-2. С. 111-112.

11. Mazanov S.V., Gumerov F.M., Ysmanov R.A., Gabitova A.S., Zarirov Z.I., Varfolomeev S.D., Voleva V.B., Shapovalov Yu. A. Biodizilnoe toplivo. J1 Sposoby polyjeniya // Izvestiya vyshyh ytshebnyh zavedeni. Problem Energetiki. 2022. T.24. №4. С. 16-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-16-49.

12. Mazanov S.V., Zarirov Z.I., Gumerov F.M., Ysmanov R.A., Shapovalov Yu. A. Biodizilnoe toplivo. J2. Teplofizicheskie osnova system, yschastvyuychih v processe polyscheniya biodizilnogo topliva s

ispolzovaniem raboschih sred v sverhkritoscheskom flyuidnom sostiyanii // Izvestiya vyshyh ytshebnyh zavedeni. Problem Energetiki. 2022. T.24. №4. С. 16-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-16-49.

13. Mazanov S.V., Gumerov F.M., Kyrdyukov A. I., Gabitova A.S., Ysmanov R.A., Safiyllina L.H., Zaripov Z.I., Shapovalov Yu. A. Biodizilnoe toplivo. J3. Kvantovo-himicheskoe issledovanie i modelirovanie processa // Izvestiya vyshyh ytshebnyh zavedeni. Problem Energetiki. 2023. T.25. № 1. С. 24-44. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-24-44.

14. Banashek V.E., Bygaev O.P., Solodkov V.V. i td. Ekstrakciya lipidov iz rastitelnogo I mikrobiologicheskogo syrya szhizhennymi o szhatymi gazami. Obzornaya informaciya. 1989. Vyp. 5. 36с.

15. Liza M.S, Abdul Rahman R.A, Mandana B, Jinap S, Rahmat A, Zaidul I, Hamid A. Supercritical carbon dioxide extraction of bioactive flavonoid from *Strobilanthes crispus* (Pecah Kaca) // *Food Bioprod Process*. 2010. Vol. 88. pp. 319–326.

16. Governors V.V., Safina A.V. Water-vacuum extraction of birch chaga mushroom. Kazan: RIC SHKOLA; 2022. (In Russ).

Authors of the publication

Lyudmila Yu. Sabirova – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Lenar Yu. Yarullin – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. E-mail: yarul.lenar@gmail.com.

Ilmar Sh. Khabriev – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Yaroslava Yu. Korepanova – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Tatyana O. Shinkevich – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 27.04.2024 г.

Отредактировано 13.09.2024 г.

Принято 19.09.2024 г.