

Химия и технология лекарственных препаратов
и биологически активных соединений
Chemistry and technology of medicinal compounds
and biologically active substances

УДК 66.061.3

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-3-322-331>

EDN NZRSZZ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Технологические решения для повышения эффективности сверхкритической флюидной экстракции биологически активных веществ из растительного сырья

К.М. Дёмкин, А.И. Артемьев✉, А.Т. Шевченко, Е.В. Гусева, В.И. Панфилов

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: artemev.a.i@muctr.ru

Аннотация

Цели. Разработка технологических решений, направленных на повышение эффективности сверхкритической флюидной экстракции полярных биологически активных веществ из растительного сырья, является актуальной задачей. Целью данной работы является стабилизация состава экстрагента за счет непрерывной подачи полярного соразтворителя в поток сверхкритического диоксида углерода.

Методы. В качестве модельного объекта были использованы плоды черной смородины (*Ribes nigrum* L.), содержащие полифенолы, которые относятся к группе наиболее трудноизвлекаемых соединений. В работе были использованы два типа подготовленного сырья, полученные с помощью тепловой сушки при температуре 50°C в течении 48 ч и лиофильной сушки при давлении 68 Па и температуре до 25°C в течении 48 ч. Для получения экстрактов применялся метод сверхкритической флюидной экстракции в экстракторе высокого давления с объемом 250 мл. Процесс проводился при температуре 50°C и давлении 200 бар при пяти различных режимах: чистым CO₂, с добавлением этанола, с добавлением ацетона и с различным способом подачи экстрагента в экстрактор высокого давления.

Результаты. Установлено, что наибольшая эффективность извлечения полифенолов достигается при использовании тепловой сушки сырья в сочетании с непрерывной подачей этанола в качестве соразтворителя, что позволило получить максимальные значения выхода экстракта (22.47 мас. %) и полифенолов (4.95 мас. %). Экспериментально подтверждено, что режимы с применением ацетона обеспечивают высокий выход экстрактивных веществ, однако их использование ограничено токсичностью растворителя, тогда как непрерывная подача этанола является более перспективным и безопасным методом интенсификации процесса. Выявлено, что образцы, подвергнутые тепловой сушке, систематически демонстрируют более высокие показатели выхода как экстракта, так и целевых полифенолов по сравнению с лиофильно высушенным сырьем во всех исследованных режимах экстракции.

Выводы. Установлено, что выбор метода сушки на этапе подготовки сырья оказывает значимое влияние на эффективность экстракции, причем тепловая сушка обеспечивает более высокий выход экстракта по сравнению с лиофильной. Экспериментально подтверждено, что добавление полярных соразтворителей повышает растворимость полифенолов, при этом наибольшая эффективность среди режимов с однократным внесением достигается при использовании ацетона, однако рекомендуется использовать нетоксичный этанол. Переход от разового внесения соразтворителя к непрерывной подаче позволяет увеличить суммарный выход экстракта в 6.4 раза, содержание полифенолов в 17 раз. Предложенный подход универсален и может быть применен для экстракции широкого спектра полярных соединений; для менее полярных веществ ожидается еще более высокая эффективность.

Ключевые слова

сверхкритическая флюидная экстракция, полярные соединения, полифенолы, соразтворитель, модернизация оборудования

Поступила: 21.09.2025

Доработана: 30.10.2025

Принята в печать: 24.04.2026

Для цитирования

Дёмкин К.М., Артемьев А.И., Шевченко А.Т., Гусева Е.В., Панфилов В.И. Технологические решения для повышения эффективности сверхкритической флюидной экстракции биологически активных веществ из растительного сырья. *Тонкие химические технологии*. 2026;21(3):322–331. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-3-322-331>

RESEARCH ARTICLE

Technological solutions for enhancing the efficiency of supercritical fluid extraction of biologically active substances from plant raw materials

Kirill M. Demkin, Artem I. Artemiev✉, Alla T. Shevchenko, Elena V. Guseva, Victor I. Panfilov

Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: artemev.a.i@muctr.ru

Abstract

Objectives. The development of technological solutions aimed at increasing the efficiency of supercritical fluid extraction of polar biologically active substances from plant materials is a priority direction due to the demand for such substances in the food and pharmaceutical industries. The aim of this study is to develop an approach for stabilizing extractant composition by continuously feeding a polar cosolvent into a supercritical carbon dioxide flow.

Methods. The study was carried out on blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) fruits, which contain polyphenols, one of the most difficult-to-extract compounds. Two types of prepared raw materials were used: heat-dried at 50°C for 48 h; freeze-dried at a pressure of 68 Pa and a temperature of up to 25°C for 48 h. Extracts were obtained by supercritical fluid extraction in a 250-mL high-pressure extractor. The process was carried out at a temperature of 50°C and a pressure of 200 bar in different modes: using pure CO₂; with the addition of ethanol; with the addition of acetone; and employing different methods for feeding the extractant into the high-pressure extractor.

Results. The highest efficiency of polyphenol extraction was achieved using heat drying of the raw materials in combination with a continuous supply of ethanol as a cosolvent, which enabled the highest yields of extract (22.47 wt %) and polyphenols (4.95 wt %). The experiments confirmed that the modes using acetone provide a high yield of extractive substances; however, their use is limited by the toxicity of the solvent, whereas a continuous supply of ethanol is a more promising and safer method for process intensification. Peat-dried samples consistently demonstrated higher yields of both extract and target polyphenols in comparison with freeze-dried raw materials in all extraction modes studied.

Conclusions. The choice of drying method at the stage of raw material preparation is shown to have a significant impact on extraction efficiency: heat drying provides a higher extract yield than freeze drying. The experiments confirmed that the addition of polar cosolvents increased the solubility of polyphenols. While the highest efficiency among single-addition modes was achieved using acetone, ethanol is recommended due to its non-toxicity. By using a continuous flow of a cosolvent instead of its a single addition, the total extract yield is increased by 6.4 times, and the polyphenol content by 17 times. The proposed universal approach can be applied to the extraction of a wide range of polar compounds; even higher efficiency is expected for less polar substances.

Keywords

supercritical fluid extraction, polar compounds, polyphenols, cosolvent, equipment modernization

Submitted: 21.09.2025

Revised: 30.10.2025

Accepted: 24.04.2026

For citation

Demkin K.M., Artemiev A.I., Shevchenko A.T., Guseva E.V., Panfilov V.I. Technological solutions for enhancing the efficiency of supercritical fluid extraction of biologically active substances from plant raw materials. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2026;21(3):322–331. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-3-322-331>

ВВЕДЕНИЕ

Полярные соединения растительного происхождения представляют значительный интерес для пищевой и фармацевтической промышленности. Данные вещества обладают выраженной антиоксидантной и противовоспалительной активностью, а также могут выполнять пребиотические функции, что обуславливает их высокую востребованность для получения функциональных продуктов и фармацевтических препаратов [1]. Однако эффективная экстракция этих веществ из растительного сырья затруднена в связи с их высокой полярностью и нестабильностью при повышенных температурах [2, 3]. Традиционные методы экстракции, в частности, термическая и ультразвуковая, часто приводят к частичному разрушению биологически активных веществ (БАВ) или требуют больших объемов органических растворителей для проведения процесса [3]. В этом контексте сверхкритическая флюидная экстракция (СКФЭ) с использованием диоксида углерода CO_2 является перспективной альтернативой, поскольку сочетает такие преимущества процесса, как применение нетоксичных растворителей, возможность селективного извлечения БАВ и мягкие условия проведения процесса [4].

Несмотря на очевидные преимущества СКФЭ, применение данного метода для извлечения полярных веществ, в частности, полифенолов из растительного сырья, ограничено в связи с рядом технологических требований. Чистый CO_2 , вследствие низкой полярности, характеризуется ограниченной растворимостью полифенольных соединений, что снижает эффективность извлечения полярных БАВ. Для повышения растворяющей способности экстрагента в практике применяется добавление полярных сорбентов, в частности этанола и ацетона [5]. Стоит отметить, что традиционный подход к введению сорбителя в процесс СКФЭ, а именно однократное введение его в аппарат перед экстракцией, не позволяет поддерживать стабильную концентрацию полярного сорбителя на протяжении всего процесса. Это ограничивает общую эффективность метода и может снижать воспроизводимость результатов.

Для повышения эффективности процесса необходимо не только пересмотреть режимы его проведения, но и изменить принцип введения сорбителя. Как уже говорилось ранее, однократное добавление полярного сорбителя перед началом экстракции

приводит к его быстрому вымыванию и снижению растворяющей способности экстрагента в дальнейшем. Более предпочтительным подходом является постепенное внесение сорбителя на протяжении всего процесса. Для реализации данного подхода требуется модернизация оборудования: в технологическую схему вводится дополнительный насос, обеспечивающий непрерывную подачу полярного сорбителя в поток сверхкритического CO_2 . Такая конструкция позволяет поддерживать постоянную концентрацию сорбителя в экстрагенте, повышает селективность и обеспечивает более эффективное извлечение полярных БАВ. На базе Казанского национального исследовательского технологического университета проводятся исследования выхода фенольных соединений и тритерпенов из трутовика, скошенного на экспериментальной экстракционной установке, близкой к промышленным масштабам, с применением в качестве сорбителя этилового спирта для прогнозирования и оценки эффективности применения процесса СКФЭ [6].

На данный момент многие эксперименты проводятся на оборудовании иностранного производства компаний *Rexo Engineering* (Южная Корея), *Waters* (США) [7–9]. Для реализации сверхкритической флюидной CO_2 -экстракции разработаны пилотные установки на базе российских заводов ООО «Компания Караван»¹, НИЦ ЭР «ГОРО»², ООО Фирма «Явента»³. Следует учитывать, что реализованное технологическое решение не предполагает добавление сорбителя при процессе сверхкритического экстрагирования и таким образом ограничивает возможности получения целевых полярных соединений из растительного сырья. При этом, несмотря на реализацию сверхкритических установок, серийный выпуск высокотехнологичного оборудования высокого давления в промышленном масштабе на территории России практически отсутствует [6, 10, 11].

Целью данного исследования является повышение эффективности извлечения полифенолов методом СКФЭ из растительного сырья за счет оптимизации технологических режимов и модернизации экстракционного оборудования. В работе предложены решения по стабилизации состава экстрагента путем непрерывной подачи сорбителя. Представленные экспериментальные данные позволяют установить влияние технологических и конструктивных факторов на процесс СКФЭ и открывают возможности для

¹ Компания Караван. URL: <https://kuban-co2-karawan.ru/>. Дата обращения 27.10.2025. [Karavan. URL: <https://kuban-co2-karawan.ru/>. Accessed October 27, 2025 (in Russ.).]

² Группа компаний «Горо». URL: <https://extract.ru/>. Дата обращения 27.10.2025. [NITs ER GORO. URL: <https://extract.ru/>. Accessed October 27, 2025 (in Russ.).]

³ ООО Фирма «Явента». URL: <https://javenta.ru/>. Дата обращения 27.10.2025. [Yaventa. URL: <https://javenta.ru/>. Accessed October 27, 2025 (in Russ.).]

создания более эффективных и селективных технологий получения экстрактов с требуемой биологической активностью из растительного сырья.

В рамках исследования в качестве модельного растительного сырья были выбраны плоды черной смородины (*Ribes nigrum* L.), поскольку они характеризуются высоким содержанием БАВ, в том числе антоцианов, кверцетина и других полифенолов с выраженными антиоксидантными свойствами [12]. При этом именно полифенолы относятся к группе наиболее трудно-извлекаемых методом СКФЭ соединений, что делает их предпочтительным объектом для проверки эффективности разработанного подхода. Кроме того, плоды черной смородины являются доступным и широко

распространенным плодово-ягодным сырьем в условиях России. Среди выращиваемых ягод доля черной смородины составляет 33% (в мире — в среднем 11%) [13]. На данный момент ежегодно перерабатывается значительное количество плодов черной смородины и полученные продукты переработки, такие как жмых, могут быть повторно использованы для выделения БАВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ЭТАП

Изучение процесса СКФЭ проводилось на установке с объемом экстрактора 250 мл. На рис. 1 представлена технологическая схема модернизированной установки для проведения процесса СКФЭ.

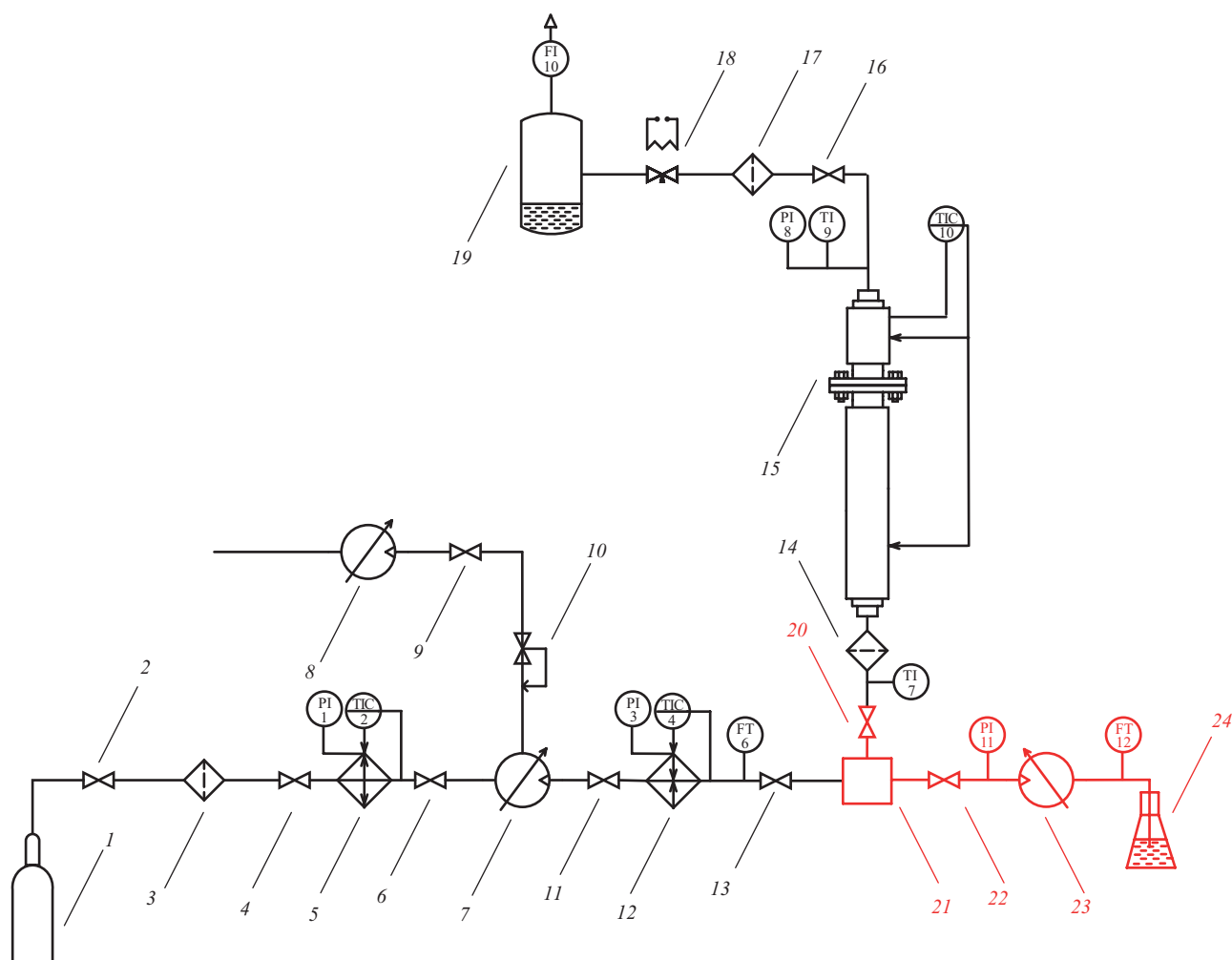


Рис. 1. Технологическая схема установки для проведения процесса сверхкритической флюидной экстракции: (1) баллон с CO₂; (2, 4, 6, 9, 11, 13, 16, 20, 22) запорные клапаны; (3, 14, 17) микронные фильтры; (5) конденсатор; (7, 23) насос; (8) компрессор; (10) редуктор давления; (12) термостат; (15) экстрактор высокого давления объемом 250 мл; (18) вентиль тонкой регулировки; (19) сепаратор; (21) смеситель; (24) емкость с соразтворителем; TIC2, TIC4, TIC9 — регуляторы температуры; FT5, FT12 — массовый расходомер; FI10 — ротаметр; PI1, PI3, PI7, PI11 — манометры; TI6, TI8 — термометры

Fig. 1. Process flow diagram of the supercritical fluid extraction setup: (1) CO₂ cylinder; (2, 4, 6, 9, 11, 13, 16, 20, 22) shut-off valves; (3, 14, 17) micron filters; (5) condenser; (7, 23) pumps; (8) compressor; (10) pressure reducer; (12) thermostat; (15) 250-mL high-pressure extractor; (18) fine adjustment valve; (19) separator; (21) mixer; (24) container with cosolvent; (TIC2, TIC4, TIC9) temperature controllers; (FT5, FT12) mass flow meters; (FI10) rotameter; (PI1, PI3, PI7, PI11) pressure gauges; (TI6, TI8) thermometers

В ходе СКФЭ CO_2 поступает в жидком состоянии из баллона (1) в конденсатор (5), где охлаждается до 5°C . Далее с помощью пневматического насоса (7), работающего от компрессора (8), жидкий CO_2 нагнетается в систему до давления 200 бар. Перед подачей в экстрактор (15) CO_2 нагревается в термостате (12). При достижении температуры выше 31°C CO_2 переходит в состояние сверхкритического флюида, резко расширяется и подается в экстрактор высокого давления (15) с предварительно загруженным в него высушенным растительным сырьем (40 г). После прохождения экстрактора (15) CO_2 с растворенными в нем БАВ проходит через вентиль тонкой регулировки (18), с помощью которого задается расход выходящей из экстрактора смеси. После этого смесь поступает в сепаратор (19), где происходит разделение CO_2 и экстракта: CO_2 переходит из сверхкритической фазы в газообразную, а экстракт выпадает в осадок. При этом происходит резкий спад давления и температуры. После окончания экстракции давление в экстракторе (15) снижается до атмосферного, температура выравнивается с температурой окружающей среды ($20\text{--}25^\circ\text{C}$), экстрактор разгерметизируется и шрот удаляется.

Для устранения ограничений, связанных с однократным введением сорастворителя, была проведена модернизация экстракционной установки. В технологическую схему был введен дополнительный мембранный электрический насос (23) высокого давления, обеспечивающий непрерывную подачу сорастворителя непосредственно в поток сверхкритического CO_2 перед экстрактором. Внешний вид модифицированной установки показан на рис. 2.

Перед проведением СКФЭ обязательным этапом является удаление влаги из растительного сырья посредством сушки, поскольку вода практически нерастворима в сверхкритическом CO_2 [14]. При этом выбор метода сушки оказывает значительное влияние как на сохранность клеточных структур сырья, так и на сохранность БАВ.

В ходе работы было получено два типа подготовленного сырья в зависимости от способа сушки (лиофильная или тепловая). Подготовка сырья осуществлялась с помощью миксера LM-1000 (Stegler, Китай). В случае тепловой сушки растительное сырье загружалось в сушильный аппарат для овощей и фруктов модели MT-FD188A (MARTA, Россия). Процесс проводился при установленной температуре 50°C в течение 48 ч. Высушенные плоды подвергались измельчению с использованием лабораторной мельницы Stegler LM-1000. После измельчения порошок просеивался через сито с размером ячеек 0.5 мм до достижения однородности гранулометрического состава. Такой подход обеспечивал получение порошка с частицами размером менее 0.5 мм.



Рис. 2. Установка сверхкритической флюидной экстракции

Fig. 2. Supercritical fluid extraction device

В случае лиофильной сушки изначально цельное сырье размалывали до однородной массы, замораживали и потом помещали в лиофильную сушилку. Процесс лиофильной сушки проводился с использованием установки CoolSafe Touch 100-9 (LaboGene, Дания).

С каждым типом сырья была проведена серия экспериментальных исследований: экстракция проводилась при пяти режимах, различающихся по типу используемого сорастворителя и способу его применения в процессе; параметры процесса: давление 200 бар и температура 50°C . Подробная схема экспериментальных стадий представлена на рис. 3.

В режиме I образцы выдерживали в среде чистого CO_2 в течение 30 мин, после чего процесс экстракции сырья продолжался чистым CO_2 при расходе 1 кг/ч в течение 60 мин. В режиме II предусматривалась 30-минутная выдержка в среде CO_2 с добавлением этанола, далее проводили экстракцию чистым CO_2 при расходе 1 кг/ч в течение 20 мин. В режиме III сырье выдерживали в среде CO_2 с этанолом в течение 30 мин, после чего экстракция завершалась мгновенным сбросом давления. В режиме IV предусматривалась 30-минутная выдержка в среде CO_2 с добавлением ацетона, далее проводили экстракцию чистым CO_2 при расходе 1 кг/ч в течение 20 мин. В режиме V образцы также выдерживали в среде CO_2 с ацетоном в течение 30 мин, затем экстракцию завершали мгновенным сбросом давления.

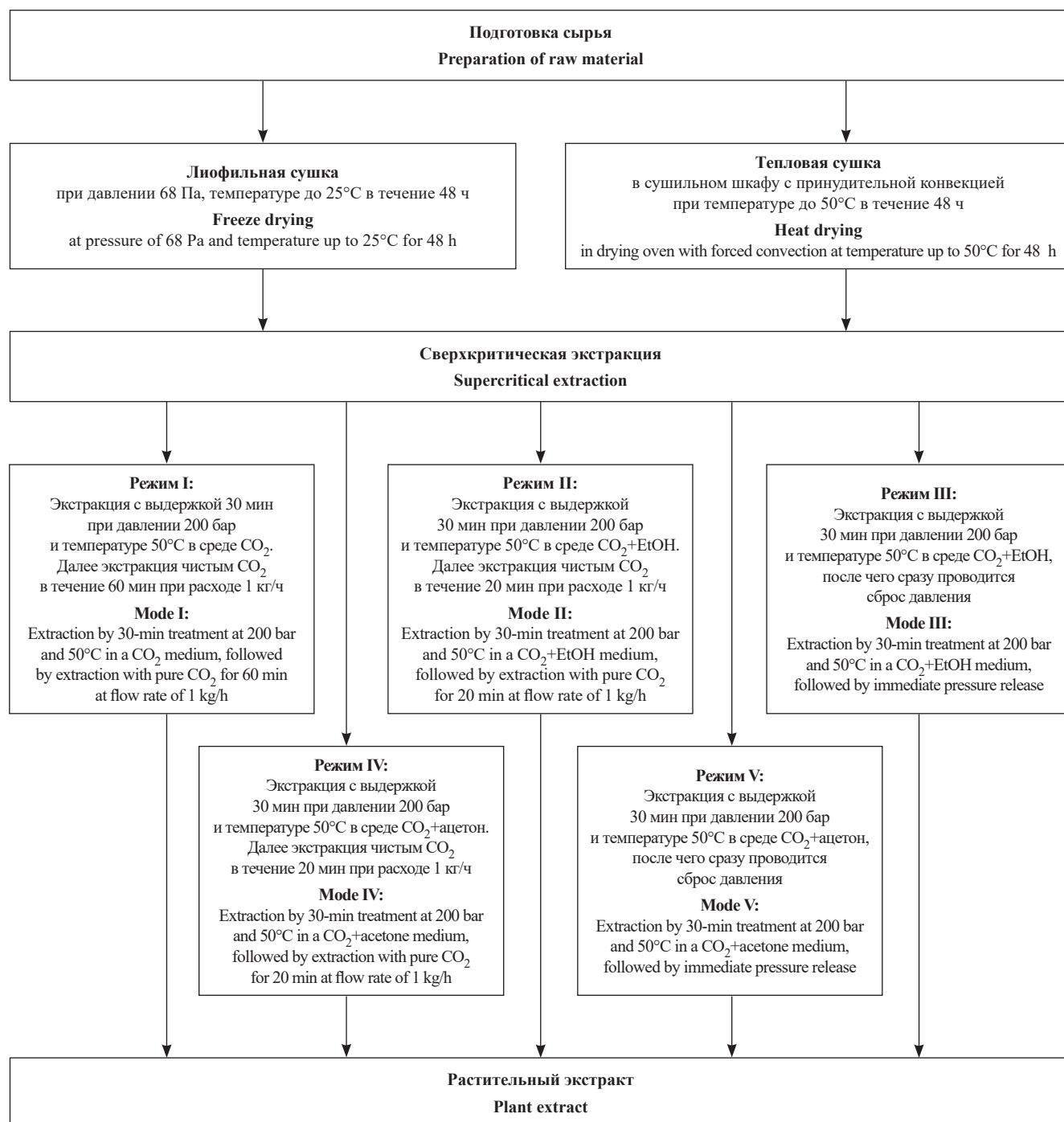


Рис. 3. Блок-схема процессов получения растительных экстрактов

Fig. 3. Block diagram of the processes for obtaining plant extracts

Каждому образцу было присвоено условное обозначение. Первая буква отражала способ предварительной подготовки сырья: «Т» — тепловая сушка, «Л» — лиофильная сушка. Вторая часть обозначения представляла собой цифру, соответствующую конкретному режиму проведения экстракции (I–V). Для каждого образца проводили серию из трех экспериментов.

Для устранения ограничений, связанных с однократным введением сорастворителя, была проведена модернизация экстракционной установки. Для повышения растворяющей способности сверхкритического CO₂ в экстрагент вводили этанол, который обладает полярными свойствами [15]. Его добавление изменяет диэлектрические свойства экстрагента, способствует повышению растворимости

полифенольных соединений и интенсифицирует массоперенос [16].

Экстракция с непрерывной подачей этанола проводилась при постоянном прокачивании сверхкритического CO_2 через экстрактор в течение одного часа со скоростью 1 кг/ч. Одновременно в поток вводился этанол в количестве, обеспечивающем его содержание в экстрагенте на уровне 10 мас. %. Для образцов, полученных с применением данного режима, даны условные обозначения «Т-Н» для сырья, подготовленного тепловой сушкой, и «Л-Н» — для сырья, подготовленного лиофильной сушкой.

Следует отметить, что предложенный подход требует дополнительных затрат на насосное оборудование и усложняет конструкцию системы. Однако данное техническое решение обеспечивает стабильный состав экстрагента и воспроизводимые условия проведения процесса, что повышает технологическую надежность и упрощает переход к масштабированию в промышленных условиях.

Определение суммарного содержания полифенолов в каждом полученном экстракте проводилось колориметрическим методом с использованием реагента Фолина–Чокальтеу в соответствии с методикой, изложенной в работе [17].

В качестве сравнительных методов оценки эффективности экстракции полифенолов были выбраны горячая водная экстракция и экстракция этанолом с использованием обратного холодильника. Каждому образцу было присвоено условное обозначение. Вторая часть обозначения представляла собой букву, соответствующую конкретному режиму проведения экстракции: «В» — водная экстракция; «Е» — экстракция этанолом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов представлены в таблице. Массовый выход экстракта и полифенолов рассчитывался на количество сухого сырья, загруженного в аппарат. Для каждого образца проводили серию из трех экспериментов.

Анализ экспериментальных данных показал, что использование тепловой сушки обеспечивает более высокий выход экстрактов и полифенолов по сравнению с лиофильной сушкой. Полученные результаты могут быть объяснены разрушением клеточных структур под действием температуры, что облегчает доступ сверхкритического CO_2 и соразтворителя к внутриклеточному содержанию.

Добавление этанола способствовало увеличению выхода полифенолов, однако при завершении процесса сбросом давления (Т-3, Л-3) наблюдалось снижение суммарного выхода по сравнению с режимом, где после выдержки проводилась дальнейшая экстракция чистым CO_2 (Т-2, Л-2).

Таблица. Результаты экспериментальных исследований по извлечению полифенолов из плодов черной смородины методом сверхкритической флюидной экстракции

Table. Results of experimental studies of supercritical fluid extraction of polyphenols from blackcurrant fruits

№	Образец Sample	Выход экстракта, мас. % Extract yield, wt %	Выход полифенолов, мас. % Polyphenol yield, wt %
1	Т-1	2.80	0.06
2	Т-2	2.11	0.18
3	Т-3	1.37	0.28
4	Т-4	3.51	0.29
5	Т-5	0.58	0.03
6	Т-Н	22.47	4.95
7	Л-1	1.90	0.02
8	Л-2	1.68	0.08
9	Л-3	1.14	0.02
10	Л-4	2.84	0.06
11	Л-5	0.11	0.01
12	Л-Н	16.45	3.48
13	Т-В	17.45	3.91
14	Т-Е	25.94	6.40
15	Л-В	15.44	3.56
16	Л-Е	22.57	5.62

Применение ацетона дало наибольшие выходы среди режимов с разовым внесением соразтворителя. В режиме IV выход экстракта достигал 3.51 мас. % (Т-4) при содержании полифенолов 0.29 мас. %. При этом в режиме V (с завершением процесса сбросом давления) выходы резко снижались как для тепловой, так и для лиофильной сушки.

Наилучшие показатели достигнуты при использовании модернизированной установки с непрерывной подачей этанола. Для образцов после тепловой сушки выход экстракта составил 22.47 мас. %, содержание полифенолов — 4.95 мас. % (Т-Н), что значительно превышает результаты, полученные для всех остальных режимов. Для лиофильной сушки значения были несколько ниже (16.45 мас. % и 3.48 мас. % соответственно), однако они существенно превосходили показатели серий I–V. Полученные результаты подтверждают, что стабилизация состава экстрагента за счет непрерывной подачи соразтворителя является наиболее перспективным технологическим решением для повышения эффективности СКФЭ полярных соединений.

Применение ацетона в качестве соразтворителя ограничено его токсичностью и возможным негативным влиянием при последующем использовании экстрактов в пищевых и биотехнологических процессах, поэтому в дальнейших исследованиях было решено его исключить и оставить в качестве соразтворителя только этанол.

Зачастую, широкий спектр компонентов в экстрактах может положительно влиять на рост бифидобактерий [18]. Вследствие этого, несмотря на меньший выход полифенолов, экстракты, полученные с использованием сверхкритических технологий, в дальнейшем будут исследованы в качестве добавки в культуральную среду для влияния на рост пробиотиков, таких как *Bifidobacterium breve* L. и *Bifidobacterium bifidum* L.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что эффективность сверхкритической флюидной экстракции полифенолов из растительного сырья зависит как от метода предварительной подготовки, так и от способа введения соразтворителя. Использование тепловой сушки обеспечило более высокие выходы экстракта и полифенолов по сравнению с лиофильной сушкой, что вероятно связано с разрушением клеточных структур и облегчением массопереноса. Добавление полярных соразтворителей повышало растворимость полифенолов, при этом наибольшая эффективность среди режимов с однократным внесением была достигнута при использовании ацетона. Однако применение ацетона ограничено его токсичностью и требует дополнительных стадий очистки продукта, что усложняет его использование в пищевых и биотехнологических процессах.

Наилучшие результаты при сверхкритической флюидной экстракции были достигнуты при непрерывной

подаче этанола. Такой подход позволил поддерживать стабильный состав экстрагента и обеспечить максимальные выходы экстрактов (до 22.47 мас. % при содержании полифенолов 4.95 мас. % после тепловой сушки и до 16.45 мас. % при содержании полифенолов 3.48 мас. % после лиофильной сушки). Полученные экстракты будут исследованы на биологическую активность для сравнения с экстрактами, полученными горячей водной экстракцией и экстракцией этанолом с использованием обратного холодильника.

Таким образом, предложенный метод представляет собой не только способ интенсификации сверхкритической флюидной экстракции полифенолов, относящихся к наиболее трудноизвлекаемым соединениям, но и новую концепцию организации процесса, ориентированную на повышение эффективности выделения широкого спектра полярных компонентов. Проведенные предварительные эксперименты с менее полярными соединениями, включая каротиноиды, показали еще более высокие выходы, что подтверждает универсальность и перспективность разработанного подхода.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00298, <https://rscf.ru/project/24-19-00298/>.

Acknowledgments

This study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 24-19-00298, <https://rscf.ru/project/24-19-00298/>).

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution

All authors contributed equally to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобрышева Т.Н., Анисимов Г.С., Золоторева М.С., Бобрышев Д.В., Будкевич Р.О., Москалев А.А. Полифенолы как перспективные биологически активные соединения. *Вопросы питания*. 2023;92(1):92–107. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107>
2. Ciupei D., Colișar A., Leopold L., Stănilă A., Diaconeasa Z.M. Polyphenols: from classification to therapeutic potential and bioavailability. *Foods*. 2024;13(24):4131–4166. <https://doi.org/10.3390/foods13244131>
3. Antony A., Farid M. Effect of temperatures on polyphenols during extraction. *Applied Sciences*. 2022;12(4):2107–2120. <https://doi.org/10.3390/app12042107>

REFERENCES

1. Bobrysheva T.N., Anisimov G.S., Zolotoreva M.S., Bobryshev D.V., Budkevich R.O., Moskalov A.A. Polyphenols as promising bioactive compounds. *Voprosy pitaniya = Problems of Nutrition*. 2023;92(1):92–107 (in Russ.). <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107>
2. Ciupei D., Colișar A., Leopold L., Stănilă A., Diaconeasa Z.M. Polyphenols: from classification to therapeutic potential and bioavailability. *Foods*. 2024;13(24):4131–4166. <https://doi.org/10.3390/foods13244131>
3. Antony A., Farid M. Effect of temperatures on polyphenols during extraction. *Applied Sciences*. 2022;12(4):2107–2120. <https://doi.org/10.3390/app12042107>

4. Меньшутина Н.В., Казеев И.В., Артемьев А.И., Бочарова О.А., Худеев И.И. Применение сверхкритической экстракции для выделения химических соединений. *Известия вузов. Химия и хим. технология.* 2021;64(6): 4–19. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216406.6405>
5. Меньшутина Н.В., Казеев И.В., Худеев И.И., Артемьев А.И., Флегонтов П.А., Дашкин Р.Р. Извлечение аралозидов сверхкритической экстракцией из аралии маньчжурской. *Известия вузов. Химия и хим. технология.* 2022;65(4): 22–29. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226504.6523>
6. Хайрутдинов В.Ф., Сабирова Л.Ю., Яруллин Л.Ю., Коваленко С.А., Габитов Ф.Р., Ахметзянов Т.Р. Извлечение фенольных соединений и тритерпенов из *Inonotus obliquus* с использованием сверхкритического флюидного экстракционного процесса. *Химия растительного сырья.* 2024;2:394–400. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240213416>
7. Табакаева О.В., Табакаев А.В., Силантьев В.Е., Капуста С.В. Антиоксидантные свойства сверхкритических экстрактов бурых водорослей. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология.* 2024;14(2):253–264. <https://doi.org/10.21285/achb.922>
8. Razgonova M.P., Sabitov A.S., Senotrusova T.A., Lee N.G., Vitomskova E.A., Golokhvast K.S. Ribes fragrans Pall.: Supercritical CO₂-extraction and complete plant metabolome. *Botanica Pacifica.* 2024;13(2):61–72. <https://doi.org/10.17581/bp.2024.13209>
9. Репина В.И., Ивахнов А.Д., Покрышкин С.А., Кожевников А.Ю. Способ извлечения масла, обогащенного дубильными веществами, из шрота морошки. *Химия растительного сырья.* 2025;1:197–207. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250114925>
10. Бурак Л.Ч. Перспективы использования технологии сверхкритического диоксида углерода в пищевой промышленности. Обзор предметного поля. *Ползуновский вестник.* 2025;1: 32–50. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.004>
11. Сошин С.А., Мазанов С.В., Хайрутдинов В.Ф., Амирханов Р.Д., Гумеров Ф.М. Реализованные в промышленном масштабе сверхкритические флюидные технологии. *Вестник Казанского технологического университета.* 2015;18(4):161–164. <https://elibrary.ru/rogwbx>
12. Коденцова В.М., Рисник Д.В., Серба Е.М., Абрамова И.М., Соколова Е.Н., Крючкова Е.Р., Римарева Л.В. Перспективы комплексной переработки ягод черной смородины. *Техника и технология пищевых производств.* 2024;54(3):621–632. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2525>
13. Латков Н. Ю., Видякин А.В., Коржук А.Б., Латкова Е.В. Анализ и перспективы развития ягодного растениеводства в РФ. *Int. Agricultural J.* 2020;63(6):10231. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44539614>
14. Голубев Э.В., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н.В. Разработка совмещенных процессов сверхкритической сушки и стерилизации высокопористых материалов. *Рос. хим. журн.* 2024;68(2):93–100. <https://elibrary.ru/item.asp?id=75081565>
15. Скребец Т.Э., Ивахнов А.Д., Репина В.И. Экстракция хлорофиллов и каротиноидов из еловой хвои сверхкритическим диоксидом углерода. *Химия растительного сырья.* 2023;2:253–259. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211878>
16. Паршина А.Э., Маматмуродов Х.Б., Боголицын К.Г., Поломарчук Д.А., Попов Н.В. Сравнение экстракционной эффективности органических растворителей и бинарных систем для получения биологически активных комплексов арктических бурых водорослей. *Химия растительного сырья.* 2023;4:165–178. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230412553>
17. Landbo A.K., Meyer A.S. Effects of different enzymatic maceration treatments on enhancement of anthocyanins and other phenolics in black currant juice. *Innovat. Food Sci. Emerging Technol.* 2004;5(4):503–513. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.08.003>
4. Menshutina N.V., Kazeev I.V., Artemiev A.I., Bocharova O.A., Khudeev I.I. Application of supercritical extraction for the isolation of chemical compounds. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. = ChemChemTech.* 2021;64(6):4–19. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216406.6405>
5. Menshutina N.V., Kazeev I.V., Khudeev I.I., Artemiev A.I., Flegontov P.A., Dashkin R.R. Obtaining aralosides by supercritical extraction from *Aralia mandshurica*. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. = ChemChemTech.* 2022;65(4):22–29. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226504.6523>
6. Khayrutdinov V.F., Sabirova L.Yu., Yarullin L.Yu., Kovalenko S.A., Gabitov F.R., Akhmetzyanov T.R. Extraction of phenolic compounds and triterpenes from *Inonotus obliquus* using a supercritical fluid extraction process. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material.* 2024;2:394–400 (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240213416>
7. Tabakaeva O.V., Tabakaev A.B., Silant'ev V.E., Kapusta C.B. Antioxidant properties of supercritical extracts of brown algae. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology.* 2024;14(2):253–264 (in Russ.). <https://doi.org/10.21285/achb.922>
8. Razgonova M.P., Sabitov A.S., Senotrusova T.A., Lee N.G., Vitomskova E.A., Golokhvast K.S. Ribes fragrans Pall.: Supercritical CO₂-extraction and complete plant metabolome. *Botanica Pacifica.* 2024;13(2):61–72. <https://doi.org/10.17581/bp.2024.13209>
9. Repina V.I., Ivakhnov A.D., Pokryshkin S.A., Kozhevnikov A.Yu. Extracting oil enriched with tannins from cloudberry seeds. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material.* 2025;1: 197–207 (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250114925>
10. Burak L.Ch. Prospects for using supercritical carbon dioxide technology in food industry. Subject field overview. *Polzunovskiy vestnik.* 2025;1:32–50 (in Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.004>
11. Soshin S.A., Mazanov S.V., Khayrutdinov V.F., Amirkhanov R.D., Gumerov F.M. Industrial-scale implemented supercritical fluid technologies. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Technological University.* 2015;18(4):161–164 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rogwbx>
12. Kodentsova V.M., Risnik D.V., Serba E.M., Abramova I.M., Sokolova E.N., Kryuchkova E.R., Rimareva L.V. Prospects for complex processing of black currant berries. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv = Food Processing: Techniques and Technology.* 2024;54(3):621–632 (in Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2525>
13. Latkov N.Yu., Vidyakin A.V., Korzhuk A.B., Latkova Ye.V. Analysis and prospects for the development of berry crop production in the Russian Federation. *Int. Agricultural J.* 2020;63(6):10231. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44539614>
14. Golubev E.V., Abramov A.A., Tsygankov P.Yu., Menshutina N.V. Development of combined processes of supercritical drying and sterilization of highly porous materials. *Ros. Khim. Zh.* 2024;68(2):93–100 (in Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=75081565>
15. Skrebets T.E., Ivakhnov A.D., Repina V.I. Extraction of chlorophylls and carotenoids from spruce needles with supercritical carbon dioxide. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material.* 2023;2:253–259 (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211878>
16. Parshina A.E., Mamatmurodov H.B., Bogolitsyn K.G., Polomarchuk D.A., Popov N.V. Extraction of bioactive complexes of arctic brown algae. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material.* 2023;4:165–178 (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230412553>

18. Бочарова О.А., Карпова Р.В., Бочаров Е.В., Вершинская А.А., Барышникова М.А., Казеев И.В., Кучеряну В.Г., Киселевский М.В., Матвеев В.Б. Изыскание фитоадаптогенов и возможности использования фитокомпозиций. *Рос. биотерапевт. журн.* 2020;19(4):35–44. <https://doi.org/10.17650/1726-9784-2020-19-4-35-44>
17. Landbo A.K., Meyer A.S. Effects of different enzymatic maceration treatments on enhancement of anthocyanins and other phenolics in black currant juice. *Innovat. Food Sci. Emerging Technol.* 2004;5(4):503–513. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.08.003>
18. Bocharova O.A., Karpova R.V., Bocharov Ye.V., Vershinskaya A.A., Baryshnikova M.A., Kazeev I.V., Kucheryanu V.G., Kiselevskiy M.V., Matveyev V.B. Research of new phytoadaptogens and possibilities of herbal formulas application. *Rossiiskii bioterapevticheskii zhurnal = Russ. J. Biother.* 2020;19(4):35–44. <https://doi.org/10.17650/1726-9784-2020-19-4-35-44>

Об авторах

Дёмкин Кирилл Максимович, заведующий лабораторией кафедры химического и фармацевтического инжиниринга, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: demkin.k.m@muctr.ru. SPIN-код РИНЦ 8959-0312, <https://orcid.org/0000-0002-3299-6397>

Артемьев Артем Ильич, к.т.н., старший научный сотрудник, старший преподаватель кафедры химического и фармацевтического инжиниринга, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: artemiev.a.i@muctr.ru. Scopus Author ID 57224471354, SPIN-код РИНЦ 4757-2512, <https://orcid.org/0000-0001-8388-4806>

Шевченко Алла Тарасовна, магистрант, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: allasheff@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 7406-7852, <https://orcid.org/0009-0009-2751-9930>

Гусева Елена Владимировна, к.т.н., доцент, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: guseva.e.v@muctr.ru. Scopus Author ID 15838624000, ResearcherID E-4671-2014, SPIN-код РИНЦ 7052-6117, <https://orcid.org/0000-0002-6835-4513>

Панфилов Виктор Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой биотехнологии ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: panfilov.v.i@muctr.ru. Scopus Author ID 56810848900, SPIN-код РИНЦ 5437-7183, <https://orcid.org/0000-0002-8158-7012>

About the Authors

Kirill M. Demkin, Head of the Laboratory, Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Mendelev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: demkin.k.m@muctr.ru. RSCI SPIN-code 8959-0312, <https://orcid.org/0000-0002-3299-6397>

Artem I. Artemiev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Senior Lecturer, Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Mendelev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: artemiev.a.i@muctr.ru. Scopus Author ID 57224471354, RSCI SPIN-code 4757-2512, <https://orcid.org/0000-0001-8388-4806>

Alla T. Shevchenko, Master Student, Department of Biotechnology, Mendelev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: allasheff@mail.ru. RSCI SPIN-code 7406-7852, <https://orcid.org/0009-0009-2751-9930>

Elena V. Guseva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Mendelev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: guseva.e.v@muctr.ru. Scopus Author ID 15838624000, ResearcherID E-4671-2014, RSCI SPIN-code 7052-6117, <https://orcid.org/0000-0002-6835-4513>

Victor I. Panfilov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Biotechnology, Mendelev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: panfilov.v.i@muctr.ru. Scopus Author ID 56810848900, RSCI SPIN-code 5437-7183, <https://orcid.org/0000-0002-8158-7012>