

Теплонасосное энергоснабжение флюидной технологии получения сухих CO₂-экстрактов из травы зверобоя

Яна П. Домбровская¹ yana_dombrovskaya@inbox.ru  0000-0003-2363-7648
 Александр А. Шевцов² shevalol@rambler.ru  0000-0003-2599-5692
 Алексей В. Дранников¹ drannikov@list.ru  0000-0002-3060-8688

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

2 Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, д. 54 а, г. Воронеж, 394064, Россия

Аннотация. Производство высококачественной микробиологически чистой продукции является важной задачей для предприятий пищевой промышленности. Учитывая высокую микробиологическую загрязненность сырья (в основном муки), для производства хлебобулочных изделий, необходимо использовать комплексные технологии, а также продукты, обладающие антибактериальными или антибиотическими свойствами для предотвращения микробиологической порчи. Таким антибактериальным действием обладает трава зверобоя благодаря высокому содержанию веществ, обладающих бактерицидными свойствами (дубильные вещества, фитонциды, флавоноиды, эфирные масла) и антиоксидантов. Современные тенденции в развитии теории тепловых процессов подготовили условия для научного подхода к созданию промышленных энергосберегающих и экологически безопасных флюидных технологий получения сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья на основе теплонасосного теплоснабжения. Выбор рабочих циклов тепловых насосов, озонобезопасных рабочих тел, рациональных схем вовлечения теплонасосного оборудования в структуру технологического пота составляет значительный объем исследований в области альтернативной энергетики. Для эффективного замещения в системах теплоснабжения невозобновляемых источников энергии на теплоту возобновляемых и вторичных энергоресурсов предложена теплонасосная технология получения сухих CO₂-экстрактов из травы зверобоя, в которой рассматриваются два смежных процесса – флюидная CO₂-экстракция и распылительная сушка, для реализации температурных режимов которых используется каскадный трехступенчатый тепловой насос. Определены органолептические и физико-химические показатели, а также химический состав сухого экстракта травы зверобоя, полученного по предлагаемой технологии, свидетельствующие о высоких антибактериальных свойствах.

Ключевые слова: микробиологическая порча, антибактериальные свойства, трава зверобоя, сверхкритические флюиды, тепловой насос, CO₂-экстракция.

Heat pump power supply of fluid technology for obtaining dry CO₂-extracts from plant materials

Iana P. Dombrovskaya¹ yana_dombrovskaya@inbox.ru  0000-0003-2363-7648
 Alexander A. Shevtsov² shevalol@rambler.ru  0000-0003-2599-5692
 Alexey V. Drannikov¹ drannikov@list.ru  0000-0002-3060-8688

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

2 Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, st. Starykh Bolshevikov, 54 a, Voronezh, 394064, Russia

Abstract. Production of high-quality microbiologically pure products is an important task for food industry enterprises. Given the high microbiological contamination of raw materials (mainly flour), for the production of bakery products, it is necessary to use complex technologies, as well as products with antibacterial or antibiotic properties to prevent microbiological spoilage. St. John's wort has such an antibacterial effect due to the high content of substances with bactericidal properties (tannins, phytocides, flavonoids, essential oils) and antioxidants. Modern trends in the development of the theory of thermal processes have prepared the conditions for a scientific approach to the creation of industrial energy-saving and environmentally friendly fluid technologies for obtaining dry CO₂-extracts from plant materials based on heat pump heating. The choice of working cycles of heat pumps, ozone-safe working fluids, rational schemes of involving heat pump equipment in the structure of technological sweat constitutes a significant volume of research in the field of alternative energy. For effective substitution in heat supply systems of non-renewable energy sources for heat of renewable and secondary energy resources, a heat pump technology for obtaining dry CO₂-extracts from St. John's wort is proposed, which considers two related processes – fluid CO₂-extraction and spray drying, for realization of temperature modes of which a cascade three-stage heat pump is used. Organoleptic and physicochemical indicators, as well as the chemical composition of the dry extract of St. John's wort, obtained according to the proposed technology, are determined, indicating high antibacterial properties.

Keywords: microbiological spoilage, antibacterial properties, St. John's wort, supercritical fluids, heat pump, CO₂-extraction.

Для цитирования

Домбровская Я.П., Шевцов А.А., Дранников А.В. Теплонасосное энергоснабжение флюидной технологии получения сухих CO₂-экстрактов из травы зверобоя // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 44–49. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-44-49

For citation

Dombrovskaya Ya.P., Shevtsov A.A., Drannikov A.V. Heat pump power supply of fluid technology for obtaining dry CO₂-extracts from plant materials. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 44–49. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-44-49

Введение

Как показали многочисленные исследования, самыми уязвимыми и часто нарушающими показателями при производстве продуктов питания, как в изделиях, так и в сырье, являются микробиологические показатели. Решение этой задачи тесно связано с постоянным входным контролем основного и дополнительного сырья, соблюдением санитарно-гигиенических требований в процессе производства и упаковывания готовой продукции [1].

Учитывая высокую микробиологическую загрязненность сырья, необходимо использовать комплексные технологии, а также продукты, обладающие антибактериальными или антибиотическими свойствами для предотвращения развития микробиологической порчи. Таким продуктом является сухой экстракт травы зверобоя, благодаря высокому содержанию веществ, обладающих бактерицидными свойствами (дубильные вещества, фитонциды, флавоноиды, эфирные масла), и антиоксидантов [2].

Сухой экстракт травы зверобоя может быть получен посредством процесса экстракции в среде сверхкритического диоксида углерода с последующей сушкой. Несмотря на очевидные преимущества сверхкритических флюидных технологий их нельзя признать энергоэффективным, обеспечивающим сбалансированное распределение тепловых и материальных потоков, что не создает перспектив снижения энергозатрат на единицу массы получаемого сухого экстракта.

Современная теоретико-аналитическая база для дальнейшего развития принципиально новых сверхкритических CO₂-технологий, и прежде всего в области CO₂-экстрагирования ценных компонентов из сырья растительного происхождения отражена в работах профессора Касьянова Г.И. [3–6].

Из-за роста цен на традиционные энергоснабжающие предприятия вынуждены искать новые пути энергоснабжения с применением независимых альтернативных источников энергии. Предпосылкой для использования новых источников энергии является расширяющийся рынок современного теплонососного оборудования, способного эффективно использовать низкопотенциальную энергию, которая в большинстве случаев выбрасывается в атмосферу. Тепловые насосы могут утилизировать низкопотенциальное тепло, снижая при этом не только финансовые, но и экологические издержки предприятия [7].

Цель работы – разработка энергоэффективной технологии получения сухих CO₂-экстрактов из травы зверобоя с применением теплового насоса.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели предложена технология, в которой рассматриваются два смежных процесса – флюидная CO₂-экстракция и распылительная сушка, для реализации которых необходимы низкотемпературные и высокотемпературные источники энергии. В этой связи в технологию получения сухого CO₂-экстракта из травы зверобоя вовлечен каскадный трехступенчатый парокомпрессионный тепловой насос, позволяющий получить энергоносители разных температурного потенциала и обеспечить необходимые температурные режимы на всех стадиях предлагаемой технологии [8].

Вымытая трава зверобоя подвергалась тонкому измельчению на мельнице–дезинтеграторе МД-2 до значения 0,25 мм.

Экспериментальные исследования проведены в установке для экстракции в сверхкритической среде фирмы ООО «ЛТД», содержащей экстракционный автоклав со следующими техническими характеристиками:

Рабочее давление (атм.) до	500;
Рабочая температура (°C) до	250;
Материал (из которого выполнен 316L; экстрактор) нерж. сталь	
Внутренний объём (л)	1,5;
Внутренний диаметр (мм)	106;
Внутренняя высота (мм)	180;
Материал уплотнений	тэфлон;
Используемые флюиды	сверхкритический CO ₂ .

Измельченные цветки и вегетативная масса зверобоя помещались в специальный экстракционный картридж экстракционного сосуда. После установки картриджа в автоклав и закрытия крышки запускали в работу компрессор высокого давления, который нагнетал сверхкритический диоксид углерода в экстракционный сосуд. Отделившийся экстракт высушивали в распылительной сушилке и получали порошок экстракта зверобоя. Режим сушки поддерживали в следующем интервале значений:

Давление жидкого экстракта в форсунках, 0,2–0,4; МПа	
Расход жидкого экстракта, м ³ /ч	4,1–4,2;
Скорость движения воздушного потока 0,4–0,5; в рабочем объеме, м/с.	
Температура воздуха на входе в сушилку, °C	55–57;
Влагосодержание воздуха на входе 0,005– в сушилку, кг/кг	0,006;
Температура воздуха на выходе 30–32; из сушилки, °C	
Влажность порошка CO ₂ -экстракта, %	2,0–2,5;
Дисперсность порошка, мм	0,20–0,22;
Время сушки, с	6–7;

В процессе эксперимента по счетчику определяли удельные затраты электроэнергии на процессы CO₂-экстракции и распылительной сушки, которые на 15–20 % меньше, чем при водной экстракции и составили 360100 кДж/кг.

Результаты и обсуждение

Процесс экстракции в среде сверхкритического диоксида углерода связан со сложностью достижения критических параметров в условиях высоких температур и давлений. Для возврата отработанных энергоносителей в технологию необходимы замкнутые термодинамические циклы по материальным и тепловым потокам, что позволит обеспечить совершенствование промышленного производства сухого экстракта как энергоэффективного и экологически безопасного способа, направленного на минимизацию «парникового эффекта», охрану окружающей среды и снижение потребления ресурсов [9].

Технология получения сухих CO₂-экстрактов (рисунок 1) включает колонны экстрактора 1, 2; затворы 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10; заслонки 39, 40, 41, 42; реверсивные насосы 11, 12, транспортеры 13, 14; газожидкостный сепаратор 15; газольдер 16; двухступенчатый компрессор 17; рекуперативные теплообменники 18, 21; флюидный насос 20; резервуар для сжиженного диоксида углерода; компрессор 22; распылительная сушилка 23 (с механической или пневматической форсункой); каскадный трехступенчатый тепловой насос, включающий компрессоры 24, 25, 26 соответственно первой второй и третьей ступени, конденсатор третьей ступени 27, испарители-конденсаторы 28, 29, испаритель третьей ступени 30; терморегулирующие вентили 31, 32 и 33 первой, второй и третьей ступени; резервуар для накопления тосола 34; фильтр тонкой очистки отработанного воздуха от взвешенных частиц 35; двухсекционный аппарат для конденсации влаги из отработанного воздуха с секциями 36 и 37; сборник конденсата 38; вентилятор 43; насосы 44, 45, 46; смесители 47, 48, 49; распределители потоков 50, 51, 52, 53; материальные и тепловые потоки: 1.0 – исходное измельченное растительное сырье; 1.1 – жидкий экстракт с высоким содержанием CO₂; 1.2 – отработанное растительное сырье; 1.3 – пары диоксида углерода; 1.4 – сжиженный диоксид углерода; 1.5 – жидкий экстракт без CO₂; 1.6 – сухой экстракт; 2.0 – воздух; 3.0 – конденсат; 4.0 – тосол; 5.0 – фреон R123; 6.0 – фреон R124; 7.0 – фреон R1270 (пропелен).

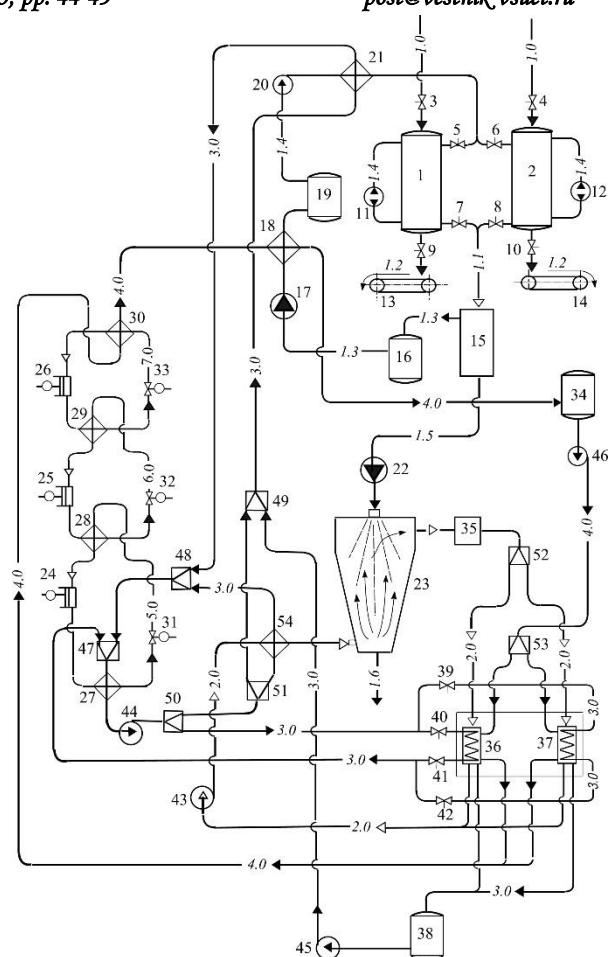


Рисунок 1. Теплонасосная технология получения сухих CO₂-экстрактов

Figure 1. Heat pump technology for obtaining dry CO₂-extracts

Измельченное растительного сырья с размерами частиц 0,5–8,0 мм подается в одну из колонн двухколонного экстрактора 1, работающей в режиме экстракции. Экстракция проводится диоксидом углерода (CO₂) в сверхкритическом (флюидном) состоянии при давлении 10–40 МПа и температуре 10–50 °C в течение 15–60 мин при закрытых затворах 3, 5, 7, 9. В процессе экстракции реверсивным насосом 11 осуществляется многократная циркуляция флюидного диоксида углерода через слой измельченного растительного сырья в режиме фильтрации, периодически меняя направление движения потока. По завершении экстракции сначала открывается затвор 7 и выводится полученный экстракт в газожидкостный сепаратор 15, а затем выгружается из колонны 1 отработанное растительное сырье через затвор 9 и отводится транспортером 13. Во время проведения экстракции в колонне 1 измельченное растительное сырье загружается в колонну 2.

Процесс экстракции растительного сырья в колонне 2 осуществляется аналогичным образом как в колонне 1. После загрузки колонны 2 закрываются затворы 4, 6, 8 и 10, проводится процесс экстракции с реверсивным движением потока жидкого CO₂ через слой растительного сырья с помощью реверсивного насоса 12, а затем через затвор 8 экстракт отводится в газожидкостный сепаратор 15, а через затвор 10 выгружается отработанное растительное сырье, которое выводится транспортером 14. Попеременная работа колонн 1 и 2 двухколонного CO₂-экстрактора обеспечивает непрерывность технологического потока в целом.

Установлено, что возможности повышения энергоэффективности тепловых и тепломассообменных процессов могут быть реализованы посредством рециркуляции диоксида углерода в непрерывном режиме получении сверхкритических флюидов как в химической технологии, так и в технологии пищевых производств [10].

Рациональные параметры перевода паров диоксида углерода после газожидкостного сепаратора 15 сначала в жидкое, затем в газообразное и далее во флюидное состояние устанавливались в соответствии с диаграммой фазового состояния диоксида углерода, после чего сверхкритический CO₂ направлялся в колонну двухколонного экстрактора, работающую в режиме экстракции.

Температурные режимы при подготовке горячей воды и тосола обеспечиваются каскадным трехступенчатым тепловым насосом [11].

Подбор рабочих тел для каждой ступени с характеристиками в требуемых пределах изменения температур в конденсаторе и испарителе осуществлялся в соответствии с энергосберегающим преобразованием теплоты в обратных термодинамических циклах Карно [12]. С точки зрения минимальной мощности на компрессионное сжатие, что непосредственно связано с экономией энергетических ресурсов, в качестве рабочих тел использованы: на первой ступени фреон R123, на второй ступени фреон R124 и на третьей ступени фреон R1270 (пропелен).

Ступенчатая структура парокомпрессионного теплового насоса позволяет обеспечить одновременное производство необходимого количества тепловой энергии для приготовления горячей воды с последующим рекуперативным теплообменом с воздухом, а также для получения холода, необходимого для сжижения диоксида углерода, и кондиционирования воздуха при его осушении.

В процессе распылительной сушки жидкого экстракта получают сухой порошок влажностью 2,0–3,5 % с эквивалентным диаметром

частиц 0,2–1,0 мм, при этом влагосодержание отработанного воздуха достигает значений 0,025–0,030 кг/кг. Для снижения влагосодержания воздуха до 0,005 кг/кг перед сушкой в контуре рециркуляции проводится его кондиционирование в двухсекционном аппарате с попеременной работой секций в режимах конденсации и регенерации.

Предлагаемая технология получения сухих экстрактов из травы зверобоя и установка для его осуществления прошли экспериментальную проверку в лаборатории инструментальных методов исследования Воронежского государственного университета инженерных технологий.

Анализ органолептических и физико-химических свойств (таблица 1) и химического состава высущенного экстракта травы зверобоя (таблица 2) говорит о возможности его использования в качестве антибактериального средства, предотвращающего микробиологическую порчу различных продуктов питания, например хлебобулочных изделий, благодаря высоким показателям антиоксидантной активности и кислотности [13].

Таблица 1.
Органолептические и физико-химические показатели сухого экстракта травы зверобоя

Table 1.
Organoleptic and physicochemical parameters of dry extract of St. John's wort

Показатель Index	Характеристика Characteristic
<i>Органолептические Organoleptic</i>	
Внешний вид Appearance	Сухой порошок
Цвет Colour	Светло-коричневый
Вкус Taste	Кисловато-сладкий
<i>Физико-химические Physic-chemical</i>	
Кислотность, град Acidity, deg	24,0
Массовая доля сухих веществ, % Mass fraction, %	96,5–98
Антиоксидантная активность, мг/г Antioxidant activity, mg/g	466,9

Таблица 2.
Химический состав сухого экстракта травы зверобоя

Table 2.
Chemical composition of dry extract of St. John's wort

Компонент Component	Значение Value
Вода, % Water, %	2,5
Белки, % Proteins, %	8,6
Жиры, % Fats, %	0,2
Углеводы, % Carbohydrates, %	88,7
Витамин А, мг/100г Vitamin A, mg/100g	30,0
Витамин С, мг/100г Vitamin C, mg/100g	45,0
Витамин Р, мг/100г Vitamin P, mg/100g	32,0
Витамин PP, мг/100г Vitamin PP, mg/100g	20,0
Дубильные вещества, % Tannins, %	10,0

Выводы

Предлагаемая технология:

- открывает реальные перспективы в разработке промышленного производства получения сухих CO₂-экстрактов из травы зверобоя с высокими антибактериальными свойствами;
- создает условия для повышения энергетической эффективности за счет возврата значительной части отработанных теплоносителей в технологический цикл, что является существенным резервом в снижении удельных

энергозатрат: при средней стоимости сухого экстракта травы зверобоя 300–500 р за 50 г порошка затраты энергии (в ценах 2025 года) на его производство примерно составляют от 18 до 25 р/г. Предлагаемая технология обеспечивает снижение себестоимости со 18–25 р/г до 14–20 р/г, то есть снижение затраченной энергии на получение 1 г сухого экстракта до 20 %;

– предотвращает выброс отработанных теплоносителей и обеспечивает экологическую чистоту предлагаемой технологии.

Литература

- 1 Королев А.А., Смирнов С.О., Фазуллина О.Ф. Определение критических контрольных точек при производстве макаронных изделий // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 106–112.
- 2 Постраш И.Ю. Трава зверобоя продырявленного: химический состав, свойства, применение // Вестник АПК Верхневолжья. 2021. № 1. С. 57–63.
- 3 Касьянов Г.И. Техника и технология использования диоксида углерода в суб- и сверхкритическом состоянии // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 1. С. 130–135.
- 4 Касьянов Г.И. Эффективность использования диоксида углерода в качестве экстрагента // Повышение качества и безопасности пищевых продуктов: мат. Х Всерос. науч.-практ. конф. 2020. С. 102–105.
- 5 Иночкина Е.В., Касьянов Г.И., Малащенко Н.Л. и др. Эффективность процесса CO₂-экстракции с позиций системного и экономического анализа // Биотехнологические, экологические и экономические аспекты создания безопасных продуктов питания специализированного назначения: мат. междунар. науч.-практ. конф. Краснодар, 2020. С. 94–99.
- 6 Меньшутина Н.В., Казеев И.В., Артемьев А.И. и др. Применение сверхкритической экстракции для выделения химических соединений // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2021. Т. 64. Вып. 6. С. 4–19.
- 7 Гумеров Ф.М. Технологии сверхкритических флюидов. Экономическая целесообразность. М.: Бутлеровское наследие, 2019. 440 с.
- 8 Surup G.R., Trubetskaya A., Tang P. et al. The effect of wood composition and supercritical CO₂ extraction on charcoal production in ferroalloy industries // Energy. 2020. Vol. 193. 116696. doi: 10.1016/j.energy.2019.116696
- 9 Домбровская Я.П., Дранников А.В., Дерканосова А.А. Научное обеспечение ресурсосберегающей технологии хлеба из пшеничной муки с длительным сроком хранения: монография. Воронеж: ВГУИТ, 2022. 109 с.
- 10 Использование тепловых насосов в мире – статистика, тенденции, перспективы. URL: <https://vteple.xyz/ispolzovanie-teplovyihnasosov-v-mire> (дата обращения: 03.02.2020).
- 11 Пат. 2810005 С1 Российская Федерация, МПК C11B 9/00, C11B 1/10. Способ получения сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья и установка для его осуществления / Домбровская Я.П., Дранников А.В., Шевцов А.А.; заявитель и патентообладатель ВГУИТ. № 2023111225; заявл. 24.04.2023; опубл. 27.11.2023, Бюл. № 36.
- 12 Трубаев П.А., Гришко Б.М. Тепловые насосы. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. 142 с.
- 13 Дранников А.В., Шевцов А.А., Домбровская Я.П. и др. Способы получения экстракта травы зверобоя для пищевой промышленности // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 2 (92). С. 147–151.
- 14 Aleshkevich Y.S., Barbashov A.V., Zaporozhskii A.A. et al. System analysis and safety of the process to obtain CO₂-extracts from plants // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 640. № 4. 042018. doi: 10.1088/1755-1315/640/4/042018
- 15 Vázquez L., Fornari T., Hernández E.J. et al. Supercritical fluid technology for lupin hulls valorization: extraction and fractionation of lupeol // Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. Vol. 14. № 24. P. 32453–32463. doi: 10.1007/s13399-024-05511-7
- 16 Burgaz O., Kocak E., Yilmaz D. et al. Extraction of phenolic compounds and antioxidant activity analysis of *Ficus carica* L. seed oil using supercritical fluid technology // International Journal of Plant Based Pharmaceuticals. 2024. Vol. 4. № 2. P. 125–130. doi: 10.62313/ijpbp.2024.251
- 17 Amangeldinova M., Kukula-Koch W., Sakipova Z. et al. Bioactive Potential of *Rheum cordatum* Losinsk. Leaf Extracts: Phytochemical Insights from Supercritical CO₂, Subcritical Ethanol and Ultrasound-Assisted Extractions // Plants. 2025. Vol. 14. № 15. 2314. doi: 10.3390/plants14152314
- 18 Karimkhani M.M., Nasrollahzadeh M., Maham M. et al. Extraction and purification of α-pinene; a comprehensive review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. Vol. 64. № 13. P. 4286–4311. doi: 10.1080/10408398.2022.2140331
- 19 Saadullah M., Ali B., Younas U. et al. Isolation and Characterization Techniques of Plant Secondary Metabolites // Plant Secondary Metabolites Chemistry and Role. Boca Raton: CRC Press, 2025. P. 25–45.
- 20 Kaundal M., Sharma R., Kumar R. Elevated CO₂ and temperature effect on growth, phenology, biomass and hypericin content of *Hypericum perforatum* L. in the western Himalaya // Plant Physiology Reports. 2021. Vol. 26. № 1. P. 116–127. doi: 10.1007/s40502-021-00571-7
- 21 Сабирова Л.Ю., Петрова И.А., Козлов А.В. и др. 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.

References

- 1 Bogatyreva T.G., Sidorova O.A. Ways to improve the microbiological purity of bakery and pasta products (control methods). Moscow: TSNITTEI Khleboproduktov, 1994. 40 p. (in Russian)
- 2 Postrash I.Yu. St. John's wort herb: chemical composition, properties, application. Bulletin of the Upper Volga Region APK. 2021. no. 1. pp. 57–63. (in Russian)
- 3 Kasyanov G.I. Equipment and technology for using carbon dioxide in a sub- and supercritical state. Bulletin of VSUET. 2014. no. 1. pp. 130–135. (in Russian)

- 4 Kasyanov G.I. Efficiency of using carbon dioxide as an extractant. In: Improving the quality and safety of food products. Proceedings of the X All-Russian scientific and practical conference. 2020. pp. 102–105. (in Russian)
- 5 Inochkina E.V., Kasyanov G.I., Malashenko N.L., Silinskaya S.M. Efficiency of the CO₂ extraction process from the standpoint of system and economic analysis. In: Biotechnological, environmental and economic aspects of creating safe specialized food products. Proceedings of the international scientific and practical conference. Krasnodar, 2020. pp. 94–99. (in Russian)
- 6 Menshutina N.V., Kazeev I.V., Artemyev A.I., Bocharova O.A., Khudeev I.I. Application of supercritical extraction for the isolation of chemical compounds. News of universities. Chemistry and chemical technology. 2021. vol. 64. no. 6. pp. 4–19. (in Russian)
- 7 Gumerov F.M. Supercritical fluid technologies. Economic feasibility. Moscow: Butlerovskoe sledstvie, 2019. 440 p. (in Russian)
- 8 Surup G.R., Trubetskaya A., Tang P. et al. The effect of wood composition and supercritical CO₂ extraction on charcoal production in ferroalloy industries. Energy. 2020. vol. 193. p. 116696. doi: 10.1016/j.energy.2019.116696
- 9 Dombrovskaya Ya.P., Drannikov A.V., Derkanosova A.A. Scientific support for resource-saving technology of bread from wheat flour with a long shelf life. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2022. 109 p. (in Russian)
- 10 Use of heat pumps in the world - statistics, trends, prospects. URL: <https://vteple.xyz/ispolzovanie-teplovyyihnasov-v-mire> (in Russian)
- 11 Dombrovskaya Ya.P., Drannikov A.V., Shevtsov A.A. Patent RU 2810005. Method for producing dry CO₂ extracts from plant raw materials and installation for its implementation. 2023. (in Russian)
- 12 Trubaev P.A., Grishko B.M. Heat pumps. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, 2009. 142 p. (in Russian)
- 13 Drannikov A.V., Shevtsov A.A., Dombrovskaya Ya.P. et al. Methods for obtaining St. John's wort herb extract for the food industry. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022. vol. 84. no. 2(92). pp. 147–151. (in Russian)
- 14 Aleshkevich Y.S., Barbashev A.V., Zaporozhskii A.A. et al. System analysis and safety of the process to obtain CO₂-extracts from plants. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. vol. 640. no. 4. p. 042018. doi: 10.1088/1755-1315/640/4/042018
- 15 Vázquez L., Fornari T., Hernández E.J. et al. Supercritical fluid technology for lupin hulls valorization: extraction and fractionation of lupeol. Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. vol. 14. no. 24. pp. 32453–32463. doi: 10.1007/s13399-024-05511-7
- 16 Burgaz O., Kocak E., Yilmaz D. et al. Extraction of phenolic compounds and antioxidant activity analysis of *Ficus carica* L. seed oil using supercritical fluid technology. International Journal of Plant Based Pharmaceuticals. 2024. vol. 4. no. 2. pp. 125–130. doi: 10.62313/ijpbp.2024.251
- 17 Amangeldinova M., Kukula-Koch W., Sakipova Z. et al. Bioactive Potential of *Rheum cordatum* Losinsk. Leaf Extracts: Phytochemical Insights from Supercritical CO₂, Subcritical Ethanol and Ultrasound-Assisted Extractions. Plants. 2025. vol. 14. no. 15. p. 2314. doi:10.3390/plants14152314
- 18 Karimkhani M.M., Nasrollahzadeh M., Maham M. et al. Extraction and purification of α-pinene; a comprehensive review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. vol. 64. no. 13. pp. 4286–4311. doi: 10.1080/10408398.2022.2140331
- 19 Saadullah M., Ali B., Younas U. et al. Isolation and Characterization Techniques of Plant Secondary Metabolites. Plant Secondary Metabolites Chemistry and Role. Boca Raton: CRC Press, 2025. pp. 25–45.
- 20 Kaundal M., Sharma R., Kumar R. Elevated CO₂ and temperature effect on growth, phenology, biomass and hypericin content of *Hypericum perforatum* L. in the western Himalaya. Plant Physiology Reports. 2021. vol. 26. no. 1. pp. 116–127. doi: 10.1007/s40502-021-00571-7
- 21 Sabirova L.Yu., Petrova I.A., Kozlov A.V. et al. Energy-saving aspects of the process of extracting bioactive compounds from plant raw materials with supercritical fluid solvents. News of higher educational institutions. Energy problems. 2024. vol. 26. no. 6. pp. 157–165. (in Russian)

Сведения об авторах

Яна П. Домбровская к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, yana_dombrovskaya@inbox.ru
[ID](https://orcid.org/0000-0003-2363-7648)

Александр А. Шевцов д.т.н., профессор, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, д. 54 а, г. Воронеж, 394064, Россия, shevalol@rambler.ru
[ID](https://orcid.org/0000-0003-2599-5692)

Алексей В. Дранников д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, drannikov@list.ru
[ID](https://orcid.org/0000-0002-3060-8688)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Iana P. Dombrovskaya Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, yana_dombrovskaya@inbox.ru
[ID](https://orcid.org/0000-0003-2363-7648)

Alexander A. Shevtsov Dr. Sci. (Engin.), professor, Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, st. Starykh Bolshevikov, 54 a, Voronezh, 394064, Russia, shevalol@rambler.ru
[ID](https://orcid.org/0000-0003-2599-5692)

Alexey V. Drannikov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, drannikov@list.ru
[ID](https://orcid.org/0000-0002-3060-8688)

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/08/2025

После редакции 18/08/2025

Принята в печать 10/09/2025

Received 11/08/2025

Accepted in revised 18/08/2025

Accepted 10/09/2025