

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

УДК 615.322

МЕХАНИЗМ И ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ CO₂-ЭКСТРАКЦИИ

Кокоулина Ирина Алексеевна, студент, специальность 36.05.01 Ветеринария, Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия
e-mail: ira.kokoulina.00@mail.ru

Макарова Вероника Алексеевна, студент, специальность 36.05.01 Ветеринария, Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия
e-mail: kostroma.makarova@mail.ru

Научные руководители: **Алишева Евгения Андреевна**, старший преподаватель кафедры биологической химии, физики и математики, Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия
e-mail: evgeniya2705@mail.ru

Микрюкова Елена Юрьевна, кандидат химических наук, доцент кафедры биологической химии, физики и математики, Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия
e-mail: elena.mikrukova@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены механизм и технологические особенности сверхкритической CO₂-экстракции при выделении хлорофилла из микроводорослей *Chlorella vulgaris*. Проанализированы параметры процесса (температура, давление, содержание соразтворителя), преимущества по сравнению с традиционными методами и основные ограничения, влияющие на экономическую целесообразность. Представлена оценка практического применения полученных экстрактов в пищевой, косметической и фармацевтической промышленности. Проанализировано 7 источников (российские и международные публикации).

Ключевые слова: микроводоросли, *Chlorella vulgaris*, хлорофилл, сверхкритическая CO₂-экстракция, пигменты, зеленые технологии.

Для цитирования: Кокоулина И. А., Макарова В. А. Механизм и особенности метода сверхкритической CO₂-экстракции // Шаг в науку. – 2026. – № 1. – С. 95–98.

MECHANISM AND FEATURES OF THE SUPERCRITICAL CO₂ EXTRACTION METHOD

Kokoulina Irina Alekseevna, student, specialty 36.05.01 Veterinary, Kazan State Agricultural University, Kazan, Russia
e-mail: ira.kokoulina.00@mail.ru

Makarova Veronika Alekseevna, student, training program 36.05.01 Veterinary, Kazan State Agricultural University, Kazan, Russia
e-mail: kostroma.makarova@mail.ru

Research advisors: **Alisheva Evgeniya Andreevna**, Senior Lecturer of the Department of Biological Chemistry, Physics and Mathematics, Kazan State Agricultural University, Kazan, Russia
e-mail: evgeniya2705@mail.ru

Mikrukova Elena Yurievna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Biological Chemistry, Physics and Mathematics, Kazan State Agricultural University, Kazan, Russia
e-mail: elena.mikrukova@gmail.com

Abstract. *The mechanism and technological features of supercritical CO₂ extraction in the isolation of chlorophyll from microalgae *Chlorella vulgaris* are considered. The process parameters (temperature, pressure, co-solvent content), advantages over traditional methods, and the main limitations affecting economic feasibility are analyzed. An assessment of the practical application of the obtained extracts in the food, cosmetic, and pharmaceutical industries is presented. 7 sources (Russian and international publications) were analyzed.*

Key words: *microalgae, *Chlorella vulgaris*, chlorophyll, supercritical CO₂ extraction, pigments, green technologies.*

Cite as: Kokoulina, I. A., Makarova, V. A. (2026) [Mechanism and features of the supercritical CO₂ extraction method]. *Shag v nauku* [Step into science]. Vol. 1, pp. 95–98.

Введение

Хлорофилл микроводорослей является ценным натуральным пигментом и биологически активным компонентом с применением в пищевой, косметической и фармацевтической индустрии. Современные требования к «чистым» экстрактам стимулируют развитие экологических методов их получения, одним из которых является сверхкритическая CO₂-экстракция. Целью работы является анализ физико-химических основ, технологических параметров и экономических аспектов применения сверхкритической CO₂-экстракции при выделении хлорофилла из *Chlorella vulgaris*, а также оценка перспективы внедрения метода в практику. Материальная база и методы: исследование выполнено на базе лаборатории микроводорослей кафедры биологической химии, физики и математики Института «Казанская академия ветеринарной медицины имени Н. Э. Баумана» Казанского государственного аграрного университета.

Материалы и методы

Сверхкритическое состояние CO₂ достигается при температурах выше 31°C и давлениях свыше 7,4 МПа, когда диоксид углерода превращается в среду с промежуточными свойствами газа и жидкости [5, с. 2]. Такое «плотное туманное» состояние позволяет CO₂ диффундировать сквозь биомассу, обеспечивая высокую проницаемость и селективное растворение жирорастворимых пигментов. CO₂ является неполярным растворителем, поэтому он эффективно извлекает неполярные биомолекулы (каротиноиды, фосфолипиды, жиры) [7, с. 254]. Для экстракции более полярных пигментов, таких как хлорофилл *a*, состоящий из кольца хлорина с ионом Mg в центре, применяют модификаторы (обычно этанол) – даже небольшие добавки спирта значительно повышают полярность экстрагента и расширяют спектр извлекаемых веществ [7, с. 256]. В целом процесс СК-CO₂-экстракции очень быстр: экстракция обычно занимает от 10 до 60 минут, после чего CO₂ легко удаляется сбросом давле-

ния, почти не оставляя следов растворителя [7, с. 253].

В литературе для СК-CO₂-экстракции пигментов из растительного и водного сырья часто используют температуры 60–80°C и давления 100–300 атм (10–30 Па). Так, в экспериментах по СК-CO₂-экстракции еловой хвои варьировали давление от 100 до 300 атм, температуру 60–80°C, концентрацию спиртового соэкстрагента от 0 до 10% и время 10–60 мин [7, с. 256]. Для хлореллы при аналогичных условиях (например, 50–70°C и 200–300 атм) получение хлорофилла обычно проводят с добавлением этанола (5–15%) как полярного соразтворителя. Этанол растворяет мембраны клеток и облегчает выход хлорофилла. Оптимальное соотношение «сырье:CO₂» подбирают экспериментально, но часто используют массу биомассы, эквивалентную 1/30–1/50 части объема жидкого CO₂. Экстракция проводится ступенчато или непрерывно: при проведении нескольких этапов или увеличении времени удается повысить выход хлорофилла.

Результаты и обсуждение

Основное преимущество этого метода – экологичность. CO₂ нетоксичен, негорюч, не имеет запаха и вкуса, и после экстракции легко удаляется без нагрева продукта [5, с. 982]. В отличие от традиционных органических растворителей, этот метод не оставляет в экстракте следов токсичных веществ [6, с. 21]. СК-CO₂-экстракция обычно происходит при умеренных температурах, что сохраняет термолабильные БАД (витамины, пигменты) почти без изменений [1, с. 163]. Кроме того, благодаря высокой селективности процесс часто позволяет сразу получать обогащенные фракции целевых веществ. Так, отмечено, что применение CO₂ повысило выход целевого пигмента (например, хлорофилла или лютеина) по сравнению с «жесткой» экстракцией. По сравнению с методами экстракции по Сокслету или ультразвуком, СК-CO₂ метод, как правило, занимает меньше времени и не требует последующего удаления растворителя нагревом [7, с. 254].

Среди недостатков указывают высокую стоимость и энергоемкость оборудования: требуется нагнетательный компрессор и термостаты для выдержки 100–300 атм, что значительно дороже простых экстракционных установок [4, с. 20]. Так, машина для сверхкритической экстракции CO₂ для эфирных масел с насосом производства компании Hangzhou AsuTech Gas Equipment Co., Ltd стоит 7 838 881,60 рублей за 1–4 аппарата.

По этой причине СК-CO₂-экстракция пока рентабельна преимущественно для дорогих продуктов и концентратов. Также без добавления соразвителя неполярный CO₂ плохо извлекает сравнительно полярные соединения (например, хлорофиллы), что требует либо дополнительной обработки биомассы – ферментативного разрушения клеточных стенок, либо добавления 5–15% этанола [2, с. 21]. В целом, метод характеризуется более «чистой» технологией: он признан более безопасным и экологичным (что важно для пищевой и фармацевтической промышленности), но требует значительных капиталовложений.

Хлорофилл из микроводорослей используется как ценный натуральный ингредиент в нескольких отраслях. В пищевой индустрии его используют в качестве пищевой добавки и натурального зеленого красителя (например, концентрированный жидкий хлорофилл упоминается в составе функциональных напитков и БАД) [3, с. 59]. В косметике экстракты хлореллы с высоким содержанием пигментов добавляют в сыворотки и маски для лица: было разработано множество рецептов средств на основе хлорофилл содержащих экстрактов *Chlorella*. Хлорофилл обладает антиоксидантным действием, улучшает микроциркуляцию кожи и способствует заживлению, поэтому его

применяют в кремах и гелях для улучшения структуры кожи (в том числе при акне и фотостарении) [2, с. 21]. В фармацевтике хлорофилл и его производные используют как дезодорирующее и заживляющее средство для терапии ран и ожогов, а также в детоксикационных «очистительных» препаратах [6, с. 984]. В общем, биомасса *Chlorella* и выделенный из нее хлорофилл обладают богатым комплексом БАД (белки, витамины, полиненасыщенные жирные кислоты, каротиноиды и микроэлементы), что делает эти экстракты перспективными компонентами пищевых добавок, косметики, препаратов для здоровья.

Заключение

Сверхкритическая экстракция CO₂ считается высокотехнологичной и «зеленой» альтернативой традиционным методам выделения биологически активных веществ из растительного и водного сырья. Последние годы демонстрируют рост интереса и НИОКР в этой области, что связано с возрастающими запросами на чистые натуральные экстракты и снижением использования органики [3, с. 60]. Однако освоение технологии идет относительно медленно из-за затрат на оборудование. Тем не менее, СК-CO₂ метод уже сегодня применяется в производствах пищевой и фармацевтической индустрии для получения концентратов антиоксидантов и пигментов практически без растворительных примесей. В перспективе ожидается дальнейшее совершенствование оборудования (снижение энергопотребления, использование многоступенчатых режимов, интеграция с инфракрасной/ультразвуковой обработкой и т.д.), что сделает СК-CO₂-экстракцию еще более эффективным методом получения БАД из микроводорослей.

Литература

1. Букин А. А. Перспективы применения CO₂ экстрактов в перерабатывающем секторе АПК // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 24–25 октября 2019 г.: в 2 ч. Ч. 2. – Минск: БГАТУ, 2019. – С. 162–164. – EDN: HAYUHR.
2. Бутова С. Н., Щеголева И. Д., Тхоржевская К. А. Получение экстрактов косметического назначения из микроводоросли *Chlorella Vulgaris* // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2018. – № 3. – С. 20–26. – EDN: YVSGVV.
3. Водяник А. Р., Шадрин А. Ю., Синев М. Ю. Сверхкритическая флюидная экстракция природного сырья: мировой опыт и ситуация в России // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. – 2008. – Т. 3, № 2. – С. 58–69.
4. Гайдукова А. А., Алексашина С. А. Методы экстрагирования биологически активных веществ и их применение в пищевой промышленности // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2025. – Т. 71, № 1. – С. 15–24. – <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2025-71-02>. – EDN: AZGJCI.
5. Денисова И. Б. Использование сверхкритического диоксида углерода для генерации электроэнергии // Вестник науки и образования. – 2019. – № 7–2 (61). – С. 33–35.
6. Калдыбаева Т. Е., Абдыкалыков Р. Д. Использование сверхкритической CO₂-экстракции для получения активных компонентов // Вестник науки. – 2025. – Т. 4, № 4 (85). – С. 981–987. – EDN: DDKQGR.

7. Скребец Т. Э., Ивахнов А. Д., Репина В. И. Экстракция хлорофиллов и каротиноидов из еловой хвои сверхкритическим диоксидом углерода // *Химия растительного сырья*. – 2023. – № 2. – С. 253–259. – <https://doi.org/10.14258/jcrpm.20230211878>. – EDN: HFRBDT.

Статья поступила в редакцию: 03.01.2026; принята в печать: 27.02.2026.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.