



## О перспективах применения сверхкритических флюидных технологий в различных отраслях промышленности

М.Н. Дадашев

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью работы являлось определение факторов развития различных отраслей российской промышленности, использующих сверхкритические флюидные технологии и способствующих переходу от лабораторных решений к промышленным масштабам. Исследуемые технологии используются в целлюлозно-бумажной, нефтегазовой, строительной, деревообрабатывающей, текстильной, автомобилестроительной, пищевой, химической, сельскохозяйственной, фармацевтической, космической отраслях, а также в медицине и сфере экологии. Рассмотрены особенности применения сверхкритических флюидных технологий в указанных направлениях. Наиболее применяемым растворителем является диоксид углерода по причине его доступности и относительно низких критических параметров. Имеются перспективы промышленного использования сверхкритической воды и других флюидов, однако их использование в промышленных масштабах требует термодинамических условий. Технологическому и промышленному суверенитету отвечают ресурсные возможности нефтегазовой, пищевой и сельскохозяйственной отраслей. Стратегическую важность представляет космическая отрасль, для которой необходимы дальнейшие исследования в сфере применения сверхкритических флюидных технологий. Отдельные отрасли российской промышленности могут способствовать суверенитету при обеспечении промышленного производства оборудования для применения перспективных технологий и расширения перечня различных растворителей в промышленных объемах. Необходимо также внедрение pilotной стадии между лабораторными исследованиями применения сверхкритических флюидных технологий и переходом к промышленному этапу. Ряд отраслей в рамках суверенитета требует увеличения объема сырьевых компонентов сверхкритических флюидных систем. В заключение указанные факторы выделены с точки зрения масштабного развития конкретизированных отраслей промышленности посредством рассматриваемых технологий.

**Ключевые слова:** сверхкритическая флюидная технология, промышленное предприятие, технологический суверенитет, промышленный суверенитет, диоксид углерода, сверхкритическая вода

**Для цитирования:** Дадашев М.Н. О перспективах применения сверхкритических флюидных технологий в различных отраслях промышленности // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. № 4. С. 559–572. DOI: 10.21285/achb.1001. EDN: DZFYJN.

### CHEMICAL TECHNOLOGY

Review article

## On the prospects for applying supercritical fluid technologies in various industries

Mirali N. Dadashev

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National University), Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The study aims to identify factors contributing to the development of various Russian industries that use supercritical fluid technologies and facilitate their transition from laboratory to industrial scale. The considered technologies are used in the pulp and paper, oil and gas, construction, woodworking, textile, automotive, food,

chemical, agricultural, pharmaceutical, and space industries, as well as in medicine and ecology. The specifics of applying supercritical fluid technologies in these sectors are considered. Carbon dioxide is the most commonly used solvent due to its availability and relatively low critical parameters. Supercritical water and other fluids have prospects for industrial use; however, their use on an industrial scale requires thermodynamic conditions. Technological and industrial sovereignty is ensured by the resource capabilities of the oil and gas, food, and agricultural industries. Of strategic importance is the space industry, which requires further research into the application of supercritical fluid technologies. Some sectors of the Russian industry can contribute to sovereignty, provided that equipment is produced for applying promising technologies and expanding the range of various solvents on an industrial scale. It is also necessary to introduce a pilot stage between laboratory research into the application of supercritical fluid technologies and the transition to the industrial stage. For several industries, sovereignty requires a greater quantity of raw materials used in supercritical fluid systems. In conclusion, the identified factors are discussed from the perspective of the large-scale development of specific industries through the considered technologies.

**Keywords:** supercritical fluid technology, industrial enterprise, technological sovereignty, industrial sovereignty, carbon dioxide, supercritical water

**For citation:** Dadashev M.N. On the prospects for applying supercritical fluid technologies in various industries. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(4):559-572. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1001. EDN: DZFYJN.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Применение сверхкритических флюидных технологий (СКФТ) в различных отраслях промышленности призвано решить ряд производственных задач, начиная с экономии электроэнергии и завершая управлением переработкой и безопасной утилизацией отходов различных перерабатывающих отраслей промышленности. В нефтегазовой отрасли с 2011 года активно дискутируется вопрос о применении СКФТ при очистке тяжелых фракций от смол и асфальтенов. Несмотря на доступность СКФТ как способа очистки и получения серы в нефтегазовой отрасли остается актуальным вопрос разработки и поставки оборудования, объема перерабатываемого сырья и выбора оптимального растворителя.

Установлено, что в сверхкритическое состояние можно перевести большинство газообразных и жидких веществ, единственным условием которых является отсутствие способности к разложению при сверхкритических параметрах. Оптимальными веществами до сих пор считаются вода и ксенон, однако технологическое использование воды при СКФТ затруднительно по причине высокой критической точки кипения. Ксенон как газовое вещество является дорогостоящим. По причине широкой доступности и относительно низких критических параметров в процессах СКФТ используют диоксид углерода, азот, водород и кислород, а также различные сорасторовители. Данные вещества не являются исчерпывающими для промышленности, однако их объединяет процесс охлаждения при температуре, соответствующей критической точке, и изменения давления. Ввиду того, что сверхкритические флюиды являются хорошими растворителями (обладают высоким коэффициентом диффузии, высокой плотностью, низкой вязкостью), их распространение нашло широкое применение в нефтехимической, фармацевтической, пищевой промышленности, медицине и в других технических отраслях [1].

Целью настоящего исследования является определение факторов развития различных отраслей российской промышленности, использующих СКФТ и способствующих ускоренному переходу от лабораторных решений к промышленным масштабам. Достижение поставленной цели возможно путем применения таких методов, как обобщение существующих результатов исследований других авторов, конкретизация особенностей химических

процессов, синтез полученных выводов при определении перспектив применения СКФТ в отраслях российской промышленности в контексте технологического и промышленного суверенитета, а также анализ факторов развития отраслей промышленности, использующих СКФТ, при переходе от лабораторных решений к промышленным масштабам.

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Ретроспективно возможности СКФТ в исследованиях рассматривались как отдельные химические процессы без систематизации общих или ключевых свойств, особенностей использования технологии, позволяющей упростить производственный процесс при решении, к примеру, экологических проблем или технических задач пищевой или иной промышленности.

Сверхкритические технологии в целлюлозно-бумажной промышленности. Последние десять лет обсуждается вопрос о применении СКФТ в целлюлозно-бумажной промышленности, сложность решения обозначенной задачи состоит в вынужденной конверсии отходов с использованием сверхкритической воды ( $T_c = 374^\circ\text{C}$  (674 К);  $P_{kp} = 22,1$  МПа). Перспективность технологии для целлюлозно-бумажной промышленности пока доказана лабораторным путем, однако переход к промышленным масштабам применения СКФТ затруднен по причине закупоривания транспортных магистралей и коррозии конструкционных материалов, выступающих неизбежным последствием использования сверхкритической воды [2]. Немаловажной способностью СКФТ является возможность очистки промышленного водного стока крупных российских предприятий. В данном случае растворителем выступает неполярный диоксид углерода, который участвует в бинарных системах: углерод – ацетон, а также углерод – фенол. Экологическая проблема, связанная с очисткой водных стоков на предприятиях, особенно в регионах, в целом решена путем применения СКФТ и кратного снижения давления, особенно при выделении фенола [3].

Некоторые подходы к использованию среды СКФТ потенциально перспективны в процессе создания

мембранных материалов, которые предназначены в целях разделения газов в промышленных условиях. Лабораторно доказано, что введение бромида бутилимидазолия (BIm+Br) в структуру поли(1-триметилсилил-1-пропина) в двухстадийном процессе при условии использования сверхкритического диоксида углерода и трифторметана позволяет модифицировать полимеры, которые отличаются термической стабильностью, качественными пленкообразующими параметрами и усиленной устойчивостью к углеводородам. Тем не менее остается спорным вопрос относительно возможности получения таким способом модифицированных полимеров в промышленных масштабах [4]. Применение СКФТ может изменить целевые направления производственных процессов, а перспективы развития данной технологии при помощи испытания новых растворителей и сред не ограничены, что формирует актуальность оценки потенциала СКФТ при укреплении технологического и промышленного суверенитета.

Сверхкритические технологии в нефтегазовой отрасли. При стандартном подходе процесс деасфальтизации тяжелых нефтяных остатков позволяет удалить высокомолекулярные асфальтены. Для деасфальтизации в качестве растворителя зачастую применяется жидкий пропан ( $T_k = 60^\circ\text{C}$ ;  $P_{kp} = 3,5 \text{ МПа}$ ). Если используется смесь пропана и пропилена ( $T_k = 100^\circ\text{C}$ ;  $P_{kp} = 11 \text{ МПа}$ ), то устраняется целесообразность полного испарения экстрагента при отделении продуктов. Методом сверхкритической деасфальтизации в нефтегазовой промышленности регулируются проблемы нефтяных остатков, а также выделения никеля и ванадия, которые, как указывалось ранее, имеются в наличии в структуре нефти в качестве порфиринов. Экспериментальным путем в свое время было зафиксировано, что объем содержания указанных порфиринов в тяжелых сортах нефти достигает 1000 г/т, они обнаруживаются в смолисто-асфальтеновой части углеводорода. Учитывая перспективность горячих сланцев, применение СКФТ позволяет интенсивно растворять находящихся в порах битумоиды, а также уменьшать прочность донорно-акцепторных взаимодействий, образуемых между отдельными фрагментами полимерной матрицы органических веществ. Таким образом, существует перспектива увеличения конверсии органических веществ горючего сланца и получения широкого перечня иных целевых нефтяных и газовых продуктов [5].

В то же время доказано, что извлечение углеводородов, в том числе нефти, при давлении ниже критического затруднительно и неэффективно в интервале температур 303–673 К и проницаемости пласта. Закачка в пласт сверхкритического диоксида углерода обеспечивает динамику коэффициента извлечения нефти более чем на 17% [6]. При сверхкритической экстракции экспериментальным путем обнаружена возможность извлечения целевых компонентов, что положительно сказывается на соотношении экстрагент – нефть. Если использовать в качестве растворителя диоксид углерода в комбинации с пропаном ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), то применение СКФТ позволяет регенерировать обработанные моторные масла, относящиеся как вид отходов к III классу опасности [7].

Сверхкритические технологии в строительной отрасли. Применение СКФТ актуально в сфере дорожного стро-

ительства, для которого при помощи экстрагирования каменного угля получают искусственный битум и производные материалы. Такой материал позволяет обеспечить долговечность дорожных покрытий, а также снизить вероятность возникновения дорожных трещин и иных дефектов. В настоящее время получаемый методом СКФТ искусственный битум широко используется при прокладывании междугородних трасс, сельских и объездных дорог в городах федерального значения, а также при покрытии внутренних территорий жилых кварталов [8]. Начиная с 2007 года, метод СКФТ используется при возведении зданий и в строительстве трубопроводов для транспортировки газа. При этом возведении зданий в большей степени метод СКФТ основан на сверхкритической импрегнации, позволяющей модифицировать полимерные и нанопористые материалы. Впоследствии указанные полимеры используются при производстве строительных материалов и строительных смесей. Метод СКФТ улучшает характеристики нанопористых полимеров, которые в будущем используются при производстве исходных материалов для покрытий при строительстве инфраструктуры территории [9].

Сверхкритические технологии в деревообрабатывающей промышленности. Эксперимент, проведенный исследователями из разных стран еще в 2004 году путем экстракции диоксида углерода при покрытии деревянных изделий с одновременным удалением пестицидов, подтвердил возможность комбинирования красителей при покрытии без нанесения ущерба деревянным изделиям. Таким образом, промышленные предприятия, которые используют различные красители и их комбинации при покрытии изделий из дерева, получили важные данные о необходимом процентном содержании пигментов, получаемых при экстракции диоксидом углерода при СКФТ и достижении таких эффектов, как получение оптимального комбинированного красителя, обеспечение безопасности для структуры изделия и безопасности использования изделия человеком в повседневной жизни [10]. Потенциал переработки древесины заслуживает отдельного внимания, так как российскими исследователями доказана ценность извлечения основных экстрактивных веществ древесины методом СКФТ, позволяющей получать высококачественное химическое сырье для многих отраслей промышленности. В настоящее время кора деревьев как вид крупнотоннажных отходов провоцирует возникновение экологических проблем, тем не менее указанное растительное сырье содержит кислоты, полифенолы, подлежащие переработке методом СКФТ из соображений экономической доступности [11]. В Российской Федерации на данный момент подобный производственный процесс не осуществляется, хотя препятствующие факторы отсутствуют.

В некоторых случаях процесс покрытия изделий на промышленных предприятиях осуществляется путем электроосаждения. Применение сверхкритических жидкостей в качестве растворителей при электроосаждении на данный момент широко не распространено. Перспективность промышленного использования электроосаждения из сверхкритических жидкостей технически может быть обеспечено при помощи сверхкритического диоксида углерода в сочетании с таким сорасторителем, как ацетонитрил ( $T_k = 272,4^\circ\text{C}$ ;  $P_{kp} = 47,7 \text{ МПа}$ ) и сверхкритический дифторметан ( $T_k = 78,4^\circ\text{C}$ ;  $P_{kp} = 5,8 \text{ МПа}$ ). Современное развитие нанотехнологий

могло бы упростить применение электроосаждения со сверхкритическими жидкостями при условии лабораторного определения групп таких жидкостей, которые по своим свойствам доступны в использовании и процессе электроосаждения [12].

**Сверхкритические технологии в текстильной промышленности.** Текстильная отрасль наиболее выражена и заметна с точки зрения смены применяемых технологий. На данный момент СКФТ используется различными крупными текстильными заводами для окрашивания тканей и их очистки, если возникает подобная производственная необходимость. Путем импрегнации и при помощи использования диоксида углерода заводы адсорбируют краситель на поверхность тканевых волокон. Такой способ позволяет красителю на молекулярном уровне проникать во все поры и покрывать ткань краской ровным слоем. Положительным моментом применения СКФТ в текстильной промышленности путем импрегнации является минимальное образование отходов, а именно токсичных сточных вод. Несмотря на то что данную технологию используют крупные текстильные заводы во многих странах, ее массовое применение отраслевыми предприятиями в целом пока не обнаружено по причине ограниченных прав соответствующей патентной технологии [13].

Российские исследователи дополнительно отмечают, что использование СКФТ и диоксида углерода в качестве растворителя в текстильной промышленности позволяет модифицировать текстильные материалы и извлекать различные примеси из их волокон. Однако на практике указанные свойства учитываются в текстильной промышленности ряда европейских стран, в которых методом СКФТ окрашивают бабины с пряжей и меняют оттенки красителя. Дополнительно метод СКФТ в рассматриваемой промышленности позволяет в два раза сократить время окрашивания материалов. Как наиболее эффективные при применении СКФТ зарекомендовали себя полизэфирные ткани, подлежащие окрашиванию за счет не только различной скорости переноса, но и дифференциального количества красителей. Для того чтобы обеспечить долговечность наносимых красителей, в некоторых случаях в качестве сорасторителей используют ацетон ( $T_k = 235$  °C;  $P_{kp} = 47$  МПа), алифатический спирт или толуол ( $T_k = 318,6$  °C;  $P_{kp} = 40,6$  МПа) [14].

Использование диоксида углерода при СКФТ адаптировано в процессе окрашивания синтетических материалов. Продолжительность применения технологий более кратковременно, нежели при окрашивании полизэфирных материалов. Подобный эффект достигается за счет постепенного изменения давления и температуры. Совершенство применения СКФТ при окрашивании синтетических материалов наглядно подтверждается возможностью прогнозирования объема наносимого красителя за одну минуту времени осуществления процесса окрашивания [15].

**Сверхкритические технологии в медицине.** Проявление промышленных перспектив СКФТ ожидается в сфере стоматологии, так как рассматриваемая технология позволяет получить ксеногенную костную крошку. Полученный материал впоследствии становится основой для имплантационного материала. Ксеноимплантаты потенциально полезны не только в стоматологии, но и

в челюстно-лицевой хирургии, так как состоят из коллагеновых волокон. Костная крошка представляет собой минеральную часть костной ткани, как правило, из бычьей кости. В настоящее время бычья кость как ксеногенный материал используется в процессе СКФТ путем экстракции ( $T_k = 50$  °C;  $P_{kp} = 250$  МПа). В дальнейшем ксеногенный материал обрабатывается в растворе перекиси водорода. В результате метод СКФТ позволяет получить имплантационный материал, обладающий высокой биосовместимостью. Если при СКФТ бычья кость измельчается, то имплантационный материал впоследствии получается рассыпчатым, стерилizedанным и сухим, что позволяет беспрепятственно применять его в челюстно-лицевой хирургии и травматологии [16]. СКФТ перспективны для стерилизации медицинских изделий. Методом сверхкритической сушки и стерилизации, а также при использовании диоксида углерода и пероксида водорода образуется конденсат, а затем происходит растворение пероксида водорода. Совмещенные процессы предупреждают разрушение пористой структуры изделий. Однако перспективность подобной технологии может проследиваться лишь в условиях высокого давления при температуре 40 °C [17]. В последнее время изучаются перспективы применения СКФТ в наномедицине по причине содержания в используемых биомакромолекулах природных активных компонентов, обладающих биосовместимостью и высокой таргетностью. Направление биомакромолекулярной медицины в целом отличается активным применением СКФТ при помощи растворителей, отличающихся высоким содержанием белка, нуклеиновых кислот и полисахаридов. Получаемые биомакромолекулы используются в качестве терапевтических агентов, особенно при борьбе с онкологическими заболеваниями [18].

**Сверхкритические технологии в сфере автомобилестроения.** Существует положительная сторона применения сверхкритического диоксида углерода, которая наблюдается в разработанной еще в 1991 году технологии распыления. Сущность ее состоит в замене летучих растворителей в стандартных покрытиях с определенным содержанием твердых частиц. Технология распыления с использованием сверхкритического диоксида углерода позволяет сократить выбросы летучих органических соединений на 80 % при помощи полимерных систем, особенно в сфере автомобилестроения [19].

**Сверхкритические технологии в пищевой промышленности.** В настоящее время особо следует отметить, что во многих отраслях пищевой промышленности для придания продукции определенного цвета, вкуса и аромата выпускаемой продукции в основном используются синтетические красители, сахарозаменители, ароматизаторы и другие добавки, которые не имеют биологической и пищевой ценности, однако их производство и применение увеличивают техногенную нагрузку на окружающую среду и наносят непоправимый ущерб здоровью населения. Данная ситуация становится возможной по причине низкой стоимости, доступности и широкого спектра цветов синтетических добавок по сравнению с натуральными. Существует острая необходимость исключения целого ряда синтетических красителей при производстве пищевой, пивобезалкогольной, ликеро-водочной, кондитерской, хлебобулочной, фармацевтической, парфюмерно-косметической и т.д. продукции. СКФТ в пищевой промышленности может стать альтернативой синтетическим красителям, так как не содержит токсичных веществ, не имеет побочных эффектов, не вызывает аллергии, не имеет запаха и не имеет вредного воздействия на организм. СКФТ может стать альтернативой синтетическим красителям, так как не содержит токсичных веществ, не имеет побочных эффектов, не вызывает аллергии, не имеет запаха и не имеет вредного воздействия на организм.

метической и другой продукции, связанной с вредным и опасным воздействием на организм человека. Для обеспечения потребностей пищевой промышленности отечественными натуральными красителями из возобновляемого растительного сырья следует коренное изменение всего технологического процесса их получения, в том числе путем промышленного использования СКФТ [20].

В пищевой промышленности СКФТ используется для различных целей, в том числе при обработке, консервировании продуктов питания и мониторинга их качества. Основным растворителем в процессе применения СКФТ выступает диоксид углерода, который эффективен при микронизации ванили, сушки свеклы, экструзии пищевых продуктов с высоким содержанием белка. Следует отметить, что препятствующим фактором для промышленного применения СКФТ является отсутствие актуальных данных о химических изменениях в продуктах питания [21]. В научном сообществе отмечают, что лабораторные испытания применения СКФТ для целей пищевой промышленности осуществляются лишь в последние два десятилетия. Наиболее заметные результаты прослеживаются в нахождении решения по сохранению продуктов питания, что отвечает существующему спросу на натуральные продукты питания [22].

Многие исследователи убеждены, что диоксид углерода отличается низкой стоимостью, отсутствием токсичности, низкими критическими параметрами, а также негорюч. Данный растворитель имеет относительно низкие критические параметры ( $T_{kp} = 31^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{kp} = 7,38 \text{ МПа}$ ). При этом следует обратить внимание, что относительная безопасность диоксида углерода как растворителя обеспечивается тремя периодами интенсивной сверхкритической экстракции [23]. На примере пищевой промышленности применение экстракции формирует способность растворителей извлекать расширенный спектр как неполярных, так и полярных соединений. Таким образом, экстракция позволяет получить обогащенные флавоноидами и алкалоидами экстракты с максимальным сохранением природного баланса биологически активных веществ. При этом экстракция методом СКФТ в настоящее время считается наиболее безопасной. Дополнительным преимуществом экстракции методом СКФТ является возможность использования ограниченного количества растворителя, что невозможно в процессе применения более традиционных методов [24].

В Иордании СКФТ применяется при проверке сортов кофе на наличие токсичных элементов, в том числе калия, железа цинка, стронция и др. Метод СКФТ позволяет получить достаточно точные данные по степени токсичности тех или иных сортов кофе согласно коэффициенту допустимой с точки зрения безопасной корреляции ( $R^2 > 0,95$ ) [25]. В других странах Ближнего и Среднего Востока распространена технология экстракции кожуры тыквы в целях повышения окислительной стабильности рапсового масла. Подобный подход к СКФТ позволяет более интенсивно поглощать свободные радикалы и восстанавливать действие железа. В результате синергетический эффект усиливает защитную эффективность от окисления рапсового масла в процессе дальнейшего хранения в стандартных условиях [26]. В указанных странах в целом проводятся лабораторные исследования

применения СКФТ с использованием семян масличных культур, обогащенных полифенолами. Использование СКФТ позволяет получать растительные масла в сжатые сроки и при низких затратах. В то же время остается нерешенной проблема прогнозирования и оптимизации параметров температуры, объема используемого диоксида углерода, давления, комбинаций методов в целях обеспечения разновидности получаемой пищевой продукции [27]. В последнее время СКФТ стали активно использовать при обработке продовольственных запасов, извлекаемых из морской среды. Употребляемые в пищу разнообразные организмы мирового океана требуют высококачественной и эффективной обработки для обеспечения микробиологической безопасности. Применение СКФТ на данный момент рассматривается как инновационная технология, однако предприятия разных стран, прибегающих к обозначенной технологии, получают возможность извлечения из океана больших объемов продовольственных ресурсов [28].

*Сверхкритические технологии в химической промышленности.* По мере развития СКФТ как направления предпринимались неоднократные попытки вычислить математическим путем группы жидкостей, физические свойства и химические параметры которых позволяют унифицировать технологический процесс вне зависимости от направления деятельности промышленных предприятий. Одна из результативных попыток была предпринята в процессе группировки сверхкритических моделей жидкости, их предельные значения обеспечиваются распределением массы жидкости по мере увеличения, начиная с нуля. Тем не менее, несмотря на возможность ограничения текучести, метод моделирования сверхкритических жидкостей как промышленный способ не обсуждается по объективным причинам, одна из которых состоит в необходимости создания и развития промышленных условий, позволяющих обеспечить процесс распределения массы сверхкритической жидкости при помощи специализированного оборудования [29].

Комплексное применение сверхкритического диоксида углерода в совокупности сnano- и микротехнологиями в свое время позволило разработать уникальные устойчивые производственные стратегии для новых лекарственных препаратов. Безопасность использования сверхкритического диоксида углерода состоит в улучшении синтеза или обработке применяемых материалов. В результате образуются трехмерные многофункциональные конструкции. Сверхкритический диоксид углерода выступает в качестве сырья или растворителя, способствующего разработке таких уникальных по своим свойствам материалов, как дендримеры или полимеры на основе оксазолина. Подобные полимерные материалы хорошо растворяются в воде, биоразлагаемы и биосовместимы. Как структурный компонент отличаются антимикробной активностью [30].

*Сверхкритические технологии в сфере сельского хозяйства.* Применение СКФТ на основе пористого оксида кремния ( $T_k = 25^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{kp} = 100 \text{ МПа}$ ) позволяет использовать комплексные системы для равномерного дозирования пестицидов в почву. Получение указанных систем возможно при реализации СКФТ и в случае, если в качестве пестицида используется валидомицин, обладающий характеристиками антибиотика и приме-

няемый для борьбы с болезнью риса. В российском сельском хозяйстве валидомицин используется в единичных случаях, так как на территории государства промышленно произрастают другие сельскохозяйственные культуры в условиях иного климата и географических особенностей. Некоторые болезни риса актуальны в странах с тропическим и муссонным климатом и проявляются поражением грибковыми инфекциями. Путем сверхкритического водного окисления возможно обезвреживание сточных вод на территории агропромышленных комплексов. При условии предварительной кавитационной обработки усиливается эффективность применения СКФТ для последующего обеспечения автотермичного процесса. В сельском хозяйстве автотермичный процесс осуществляется при создании тепловых условий содержания молодняка животных и птицы, а также при разложении органики в анаэробной среде [31]. Использование СКФТ полезно при биоремедиации окружающей среды. Таким образом, в ряде регионов производится очистка геотермальных вод от фенола в открытые водоемы. Данный процесс важен ввиду необходимости устранения твердых отложений в скважинах и трубопроводах, а также получения минерального сырья при дальнейшем использовании в сельском хозяйстве [32].

**Сверхкритические технологии в фармацевтической промышленности.** В фармацевтической промышленности диоксид углерода как растворитель используется во многом по причине экологической безопасности. Из применяемого растворителя выходит примерно 1% (по массе) получаемого продукта, при этом 50% растворителя восстанавливается в течение производимого химического процесса. Однако экологическая безопасность используемого диоксида углерода в СКФТ относительна, так как углеводородный растворитель в долгосрочной перспективе преобразуется в диоксид углерода и впоследствии становится компонентом углеродного цикла. Распространенность использования диоксида углерода в качестве растворителя постепенно становится предметом дискуссий, как и возможность использования сверхкритической воды, так как многие промышленные растворители не только опасны, но и способны полностью восстанавливаться по своим изначальным свойствам, соответственно, переработка в рамках производственного процесса может стать со временем трудоемкой и экономически нецелесообразной. Тем не менее при отсутствии иных доступных растворителей для промышленных целей диоксид углерода с высокой вероятностью будет использоваться в процессе СКФТ в обозримом будущем [33].

Некоторые исследователи отмечают, что по причине безопасности использования СКФТ такая технология в фармацевтике при разработке лекарственных препаратов устраняет проблемы, связанные с растворимостью в воде составных элементов, входящих в лекарственные препараты. Потребность в исследовании фармацевтических препаратов с улучшенной биодоступностью постоянно растет, в связи с этим применение СКФТ в условиях использования диоксида углерода позволяет получить высококачественные конечные продукты. Изменение параметров процесса, которые впоследствии оказывают влияние на термодинамические и гидродинамические свойства диоксида углерода, позволяет разрабатывать

индивидуальные рецептуры активных ингредиентов различных размеров и морфологий, а значит, влиять на качество лекарственных препаратов [34].

Важным преимуществом применения СКФТ с использованием диоксида углерода является вариативность приготовления рецептуры лекарственных препаратов. Растворимость вещества в диоксиде углерода определяет качество рецептуры при условии внедрения СКФТ методом твердой дисперсии [35]. СКФТ доказала эмпирическим путем свою пригодность для анализа значительного диапазона полярности анализаторов. При этом процесс контроля качества в фармацевтике остается достаточно консервативным, что иногда замедляет внедрение СКФТ и других перспективных технологий на несколько лет. Переход использования СКФТ при разработке лекарственных средств к промышленным масштабам, как отмечает ряд исследователей, может произойти, если существующий фармацевтический анализ достижения СКФТ будет адаптирован к нормативным требованиям промышленного производства лекарственных препаратов [36].

При всем вышесказанном технология СКФТ используется во всех направлениях фармацевтической промышленности путем соблюдения принципа сверхкритической жидкостной экстракции эмульсий, диспергирования с усилением раствора сверхкритическими жидкостями, сверхкритического антирастворителя и др. На данный момент фармацевтической промышленности в разной степени известны 23 метода использования СКФТ [37]. Заслуживают внимания попытки прогнозирования влияния эксплуатационных параметров на растворимость таких лекарственных средств, как салсалат. При использовании линейных моделей, в том числе опорной векторной регрессии и байесовской ridge-регрессии, были получены результаты моделирования, которые показали оптимальные значения растворимости салсалата в процессе применения СКФТ [38].

При помощи СКФТ можно получить липосомы при условии соблюдения определенных параметров, а именно объема дисперсии, концентрации липидов, давления, скорости перемешивания и температуры. СКФТ способствует получению липосом различного состава в соответствии с прогнозируемыми значениями. Инновационность применения СКФТ в данном случае состоит в одноступенчатом методе производства, в то время как иные традиционные способы получения липосом предполагают дополнительные стадии, в частности экструзию, для гомогенизации размера получаемых липосом [39]. При разработке лекарственных препаратов для борьбы с онкологией актуальным является не только повышение растворимости и биодоступности препаратов, но также снижение дозы употребления человеком и вероятности возникновения побочных эффектов. Методом СКФТ в настоящее время получают наночастицы капецитабина. Процесс получения данного лекарственного препарата производится при различных давлениях и температурах (120, 140, 160 МПа; 308, 318, 328 К). При этом концентрация растворенных веществ находится в диапазоне 15, 45, 75 мг/мл. В результате размер частиц препарата уменьшается и увеличивается растворимость [40]. Однако возможности СКФТ ограничены, так как применение данной технологии предполагает значительные инвестиционные

затраты на фоне отсутствия дополнительных исследовательских данных, позволяющих найти новые пути решения проблем растворимости лекарственных препаратов [41]. Тем не менее перспективы СКФТ в фармацевтике признаются научным сообществом. Китайские исследователи отмечают такие факторы перспективности, как модернизацию контрольно-измерительных приборов, появление новых путей взаимодействия с технологией в процессе проведения экспериментов, а также совместимость стационарной фазы [42].

Сверхкритические технологии в космической отрасли. В космической отрасли СКФТ целесообразны при переработке отходов путем сверхкритического окисления воды и ее рециркуляции. Однако проблема состоит в том, что неорганические компоненты в структуре отходов не растворяются в сверхкритической воде. Таким образом, в условиях микрогравитации требуется изначально отделить твердые частицы, и лишь затем – использовать СКФТ в процессе переработки отходов. Государства, активно развивающие космическую отрасль, не используют СКФТ при переработке образуемых в космосе отходов по причине сложности реализации поэтапного химического процесса [43]. Предложенный метод с использованием сверхкритических жидкостей, особенно воды, на практике возможен лишь в условиях двух режимов производственного процесса: при помощи ограниченной диффузии (окислитель впрыскивается в реактор после того, как достигаются сверхкритические значения температуры и давления для жидкости); путем смешения (используемые реагенты одновременно доводятся до сверхкритических значений температуры и давления).

Указанные режимы и их использование подлежат обсуждению в научном и производственном сообществах на предмет разработки соответствующей экспериментальной установки. До сих пор данные о проверке использования двух режимов производственного процесса со сверхкритическими жидкостями отсутствуют, что позволяет сделать предположение относительно сложности проведения эксперимента в нестандартных гравитационных условиях [44]. Поиск решения использования сверхкритической воды, несмотря на трудность достижения критической точки, может снизить степень опасности от процесса утилизации токсичных органических веществ. Различные эксперименты демонстрируют, что сверхкритическая вода полностью окисляет органические вещества в течение непродолжительного времени в замкнутых системах. Сверхкритическая вода в данном процессе является не единственным растворителем, так как в идентичном процессе могут участвовать: диоксид углерода, диоксид азота, фосфор или сера. Использование сверхкритической воды в промышленных масштабах пока затруднительно по причине отложения солей, коррозии конструкционных материалов и других проявлений гетерогенных процессов, образуемых на стенах реакционного объема [45].

Сверхкритические технологии в сфере экологии. Основное предназначение применения СКФТ в различных отраслях промышленности состоит в возможности решения многих экологических проблем. Рассматриваемая технология либо удаляет токсичные вещества или компоненты, либо снижает их долю в структуре перерабатываемого вещества или группы веществ. СКФТ способствует решению технической и экологи-

ческой проблемы выделения из нефти таких порфиринов, как никель ( $T_{kp} = 76,9$  °C;  $P_{kp} = 0,86$  МПа) и ванадий ( $T_{kp} = 3400$  °C,  $P_{kp} = 10,0-10,5$  МПа). Если путем СКФТ перерабатывается сырье, то оно становится безопасным для последующего использования в промышленности. В некоторых случаях СКФТ позволяет получать экологически безопасные материалы. Разнообразие обеспечения экологической безопасности подтверждает целесообразность развития и распространения СКФТ как одного и перспективных направлений в сфере экологии. Некоторые исследователи справедливо отмечают, что СКФТ обеспечивает чистоту производственного цикла, особенно при повторном использовании промышленных отходов. В частности, разработана методика ускоренного биоразложения полиэтиленовой пленки низкого давления, для чего в качестве среды используется фреон R22 ( $\text{CHClF}_2$ ) ( $T_{kp} = -40,8$  °C;  $P_{kp} = 4,1$  МПа). Данный растворитель экологически безопасен и способствует трехкратному ускорению биоразложения. К примеру, отходы оливкового масла могут разлагаться посредством СКФТ с использованием указанного фреона в течение полугода вместо полутора лет. Идентичные исследования с использованием циклической установки с контурной циркуляцией растворителя показали, что вместо фреона R22 ( $\text{CHClF}_2$ ) могут быть использованы иные вещества, которые выдерживают высокую температуру [46].

Одна из проблем состоит в регенерации отработанного катализатора, утилизация которого при стандартных условиях может быть не только вредной, но и экономически не обоснованной. Если использовать при очистке, к примеру, керосина СКФТ с учетом диоксида углерода как растворителя, то регенерация смеси катализаторов в результате становится более безопасной. Российскими научно-производственными предприятиями разработаны решения по безопасному выделению нефтепродуктов из нефтяных шламов. Методом СКФТ в данном случае является экстракция, а в качестве экстрагента определены бутан и пропан. Парные экстрагенты участвуют в экстракции при  $T_{kp} = 85-160$  °C;  $P_{kp} = 5-50$  МПа [47].

Обобщая существующие исследования применения СКФТ в различных отраслях промышленности, необходимо отметить, что для большинства разрабатываемых методов использования сверхкритических растворителей необходимо промежуточное звено. На данный момент реализация разрабатываемых методов возможна в основном в лабораторных условиях. Для того чтобы обеспечить промышленные масштабы использования сверхкритических растворителей, необходимо обеспечение пилотной апробации, а впоследствии – создание условий перехода от пилотной апробации к промышленным масштабам [48]. Оценка технологического и промышленного потенциала позволяет сформулировать вывод о том, что в российских условиях промышленное использование СКФТ, направленное на укрепление отраслевого суверенитета, возможно в основном путем обеспечения циркулярного производственного цикла. Ввиду того, что разрабатываемые методы использования сверхкритических растворителей могут быть пригодны в производственной деятельности предприятий смежных промышленных направлений, СКФТ должны стать источником формирования экосистем, что в настоящее время в российских условиях возможно и реализуемо [49].

**О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ  
СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ В РАЗЛИЧНЫХ  
ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Концепция развития промышленной технологической экосистемы может быть реализована путем синтеза лабораторий научно-исследовательских институтов, научно-производственных предприятий и госкорпораций. Предпосылкой к указанному синтезу служат созданные по инициативе Правительства Российской Федерации реестры отечественной промышленной продукции, за счет которых результаты лабораторных исследований, связанных с испытанием новых сверхкритических растворителей, могут быть поддержаны научно-производственными предприятиями. В результате результаты лабораторных исследований могут быть апробированы и использованы промышленными предприятиями [50]. Положительным компонентом

укрепления отраслевого суверенитета необходимо назвать способность российских разработок в сфере СКФТ стать одной из стратегических наукоемких технологий, оказывающих влияние на функциональное ресурсообеспечение многих промышленных предприятий. Российская наукоемкость в сфере СКФТ может быть аккумулирована результатами лабораторных экспериментов, которые получены к настоящему времени, совершенствована, модернизирована и адаптирована в соответствии с имеющимися ресурсами при получении ряда сверхкритических растворителей, особенно если СКФТ является основным способом технологического процесса отдельных функциональных направлений промышленных предприятий [51]. В целях объективной оценки возможности укрепления технологического и промышленного суверенитета в таблице представлены перспективы применения СКФТ в различных отраслях российской промышленности.

Перспективы применения сверхкритических флюидных технологий в отраслях российской промышленности при достижении технологического и промышленного суверенитета

Prospects for the application of supercritical fluid technologies in Russian industries to achieve the technological and industrial sovereignty

Наименование отрасли	Возможность реализации, оптимизации и адаптации
Нефтегазовая	Имеется возможность применения сверхкритических флюидов при очистке тяжелых фракций, извлечении целевых компонентов, в том числе в процессе выделения порфиринов из нефти. Используется в основном при производстве серы транспортными и добывающими предприятиями, применяющими сверхкритические флюидные технологии
Строительная	Имеющиеся российские технологии позволяют обеспечить процесс создания мембранных материалов в промышленных масштабах. Препятствующим фактором является сырьевой компонент модификации используемых в строительстве полимеров при условии применения сверхкритических флюидных технологий
Деревообрабатывающая	Существующие технологии апробированы лабораторным путем, однако ряд технических сложностей не позволяет перейти к пилотному и промышленному этапам. Кроме того, использование сверхкритических флюидных технологий в отрасли предпочтительно при помощи растворителя сверхкритической воды. На данный момент имеется возможность внедрения пилотных экстракторных систем, однако отсутствуют ресурсы для обеспечения промышленных масштабов. Каждое предприятие отрасли вынуждено обеспечивать производственный процесс путем использования сверхкритических флюидных технологий самостоятельно
Текстильная	Имеются перспективные научные разработки для создания мембранных материалов, используемых при пошиве одежды. Эффективность доказана лабораторным путем. Среди оборудования, производимого на территории Российской Федерации, имеется возможность обеспечить предприятия необходимым объемом компонентов для сверхкритических флюидных систем. Тем не менее, как и в целлюлозно-бумажной отрасли, производственные мощности возможны для текстильных предприятий на автономной основе
Медицина	В отрасли наблюдаются широкие возможности для применения сверхкритических флюидных технологий, в том числе путем синтеза смежных отраслей: сельского хозяйства, фармацевтики и медицины. Препятствующим фактором выступает отсутствие промышленного оборудования, за исключением экстракторов, универсальных реакторов и сверхкритических флюидных хроматографов, используемых в основном для анализа
Автомобильная	Многие технологии с применением сверхкритического диоксида углерода продолжительное время применяются на автомобильстроительных предприятиях. С учетом специфики производственного процесса адаптационный этап, начиная с лабораторного и завершая промышленным обеспечением, осуществляется наиболее благоприятно
Пищевая	Существует возможность адаптации сверхкритических флюидных технологий в пищевой промышленности, особенно при решении экологических задач, связанных с переработкой отходов. Данная отрасль достаточно перспективна, так как на территории государства имеются возможности производства специализированного промышленного сверхкритического флюидного оборудования. В настоящее время имеются положительные лабораторные результаты суперкритической флюидной экструзионной переработки пищевого сырья и существует опыт апробации промышленного производства каротиноидов

Химическая	Наиболее выраженное применение сверхкритических флюидных технологий наблюдается при производстве красителей и их использовании в последующих производственных цепочках. Отрасль обладает необходимыми промышленными ресурсами в части как специализированного оборудования, так и выбора растворителей
Сельское хозяйство	Перспективность разрабатываемых методов применения сверхкритических растворителей идентична таковой для пищевой и строительной отрасли, а также отрасли медицины. В сельском хозяйстве формируется благоприятная ситуация при окислении отходов, извлечении масел и получении натуральных пищевых добавок. Указанные результаты применения сверхкритических флюидных технологий переведены в промышленную стадию
Фармацевтика	Имеются доказанные лабораторным путем перспективные производственные стратегии для получения новых лекарственных препаратов. Многофункциональные конструкции при использовании сверхкритического диоксида углерода обладают дополнительной биологической ценностью, однако указанный растворитель является безопасным лишь при соблюдении некоторых условий применения рассматриваемых технологий
Космическая	По причине сложности применения сверхкритической воды при переработке отходов необходимо совершенствование сверхкритических флюидных технологий в условиях существующих режимов производственного процесса. Для Российской Федерации технологии с использованием сверхкритической воды в отрасли достаточно весомы
Экология	Данное направление является наиболее перспективным для применения сверхкритических флюидных технологий, так как существующие методы и растворители позволяют решить множество экологических проблем, в том числе при ускорении процесса биоразложения пищевых отходов, сокращении выбросов летучих органических соединений и утилизации токсичных органических веществ

Формирование технологического и промышленного суворенитета, в том числе за счет использования СКФТ на промышленных предприятиях, в настоящее время возможно лишь в отдельных отраслях. Наиболее перспективными и устойчивыми отраслями промышленного использования СКФТ являются нефтегазовая, пищевая, автомобильная отрасли, сельское хозяйство и экология. Требуют внимания целлюлозно-бумажная, строительная, текстильная, химическая отрасли, а также фармацевтика и медицина. Стратегическую важность представляет применение рассматриваемых технологий в космической отрасли, так как оно сопряжена с необходимостью проведения дополнительных исследований, направленных на упрощение использования сверхкритической воды. Указанные отрасли, которые требуют внимания при укреплении технологического и промышленного суворенитета, нуждаются в ресурсном обеспечении оборудованием и систематизации производственного процесса на промышленных предприятиях по принципу экосистемы. Некоторым отраслям, к примеру строительной, необходим сырьевой компонент, что указывает на такую проблему, как доступное получение различных сверхкритических растворителей в процессе реализации СКФТ. На данный момент СКФТ как технология наиболее реализуема во многих промышленных отраслях по причине использования диоксида углерода. Другие сверхкритические растворители могут быть использованы лишь в лабораторных условиях. Таким образом, доказанный потенциал СКФТ для развития промышленных предприятий как отраслевых комплексов требует промышленного производства оборудования, к примеру экстракторов, и дальнейшего

совершенствования процесса получения сверхкритических растворителей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Факторами развития различных отраслей российской промышленности, которые используют СКФТ и способствуют ускоренному переходу от лабораторных решений к промышленным масштабам, являются следующие:

- совершенствование использования сверхкритической воды, особенно в космической и фармацевтической отраслях;
- промышленное производство сверхкритического флюидного оборудования для целлюлозно-бумажной, строительной, текстильной и химической отраслей, а также медицины;
- расширение и адаптация различных растворителей, в том числе при их использовании в промышленных объемах;
- промышленное обеспечение использования фреона R22 при ускорении процесса биоразложения различных отходов перерабатывающих отраслей агропромышленного комплекса;
- обеспечение пилотной стадии как промежуточного этапа между лабораторным применением СКФТ для различных целей и промышленным использованием потенциала флюидов, особенно в отраслях, требующих дополнительного внимания со стороны научного и производственного сообществ;
- создание условий для увеличения объема компонентов сверхкритических флюидных систем, особенно в пищевой, фармацевтической, нефтехимической, текстильной и строительной отраслях.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Залепугин Д.Ю., Тилькунова Н.А., Чернышева И.В., Поляков В.С. Развитие технологий, основанных на использовании сверхкритических флюидов // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2006. Т. 1. N 1. С. 27–51. EDN: КАОИРН.
2. Федяева О.Н., Востриков О.Н. Переработка отходов целлюлознобумажной промышленности в сверхкритической воде (обзор) // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2018. Т. 13. N 3. С. 8–19. EDN: UWGAJU.

- 3.** Гумеров Ф.М., Зарипов З.И., Мазанов С.В., Накипов Р.Р., Хабриев И.Ш., Ахметзянов Т.Р. [и др.]. Некоторые характеристики термодинамических систем и их влияние на эффективность извлечения ценных компонентов промышленного водного стока ПАО «Казаньоргсинтез» методом сверхкритической флюидной экстракции // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2022. Т. 17. N 4. С. 3–13. DOI: 10.34984/SCFTP.2022.17.4.001. EDN: HAOPHQ.
- 4.** Полевая В.Г., Воробей А.М., Паренаго О.О. Матсон С.М. Химическая модификация поли(1-три-метилсилил-1-пропина) в среде сверхкритических флюидов для создания высокоэффективных мембранных материалов // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2025. Т. 20. N 1. С. 81–94. DOI: 10.34984/SCFTP.2025.20.1.007. EDN: TWIDFD.
- 5.** Дадашев М.Н., Кобелев К.В., Винокуров В.А., Филенко Д.Г., Магомедов З.Б., Джагаров Р.Ф. [и др.]. Перспективы применения сверхкритических флюидных технологий в различных отраслях промышленности // Мониторинг. Наука и технологии. 2017. N 1. С. 74–83. EDN: YNCCPX.
- 6.** Дадашев М.Н., Филенко Д.Г., Григорьев Е.Б., Сваровская Н.А. Влияние проницаемости пласта на коэффициент извлечения нефти сверхкритическим диоксидом углерода // Мониторинг: наука и технологии. 2024. N 3. С. 14–18. DOI: 10.25714/MNT.2024.61.002. EDN: PUEKAW.
- 7.** Филенко Д.Г., Дадашев М.Н., Винокуров В.А., Григорьев Е.Б. Сверхкритическая флюидная технология в нефтепереработке и нефтехимии // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2011. N 2. С. 82–92. EDN: RTWYVB.
- 8.** Солдуп Ш.Н., Котельников В.И., Кара-сал Б.К. Термическое растворение каменных углей Чаданского и Межегейского месторождений с бензолом при сверхкритических условиях // Материалы и технологии XXI века: сборник трудов конф. (г. Пенза, 28–29 марта 2016 г.). Пенза: Изд-во АННМО «Приволжский Дом знаний», 2016. С. 222–228. EDN: WDQWBZ.
- 9.** Zhang A., Zhang Q., Bai H., Li L., Li J. Polymeric nanoporous materials fabricated with supercritical  $\text{CO}_2$  and  $\text{CO}_2$ -expanded liquids // Chemical Society Reviews. 2014. Vol. 43, no. 20. P. 6938–6953. DOI: C4CS00100A.
- 10.** Kang S.M., Unger A., Morrell J.J. The effect of supercritical carbon dioxide extraction on color retention and pesticide reduction of wooden artifacts // Journal of the American Institute for Conservation. 2004. Vol. 43, no. 2. P. 151–160. DOI: 10.2307/4129650.
- 11.** Боголицын К.Г. Перспективы применения сверхкритических флюидных технологий в химии растительного сырья // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2007. Т. 2. N 1. С. 16–27. EDN: KAOIUR.
- 12.** Ke J., Su W., Howdle S.M., George M.W., Cook D., Perdjona-Abel M., et al. Electrodeposition of metals from supercritical fluids // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2009. Vol. 106, no. 35. P. 14768–14772. DOI: 10.1073/pnas.0901986106.
- 13.** Сошин С.А., Мазанов С.В., Хайрутдинов В.Ф., Амирханов Р.Д., Гумерова Ф.М. Реализованные в промышленном масштабе сверхкритические флюидные технологии // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. N 4. С. 161–164. EDN: ROGWBX.
- 14.** Кумеева Т.Ю., Пророкова Н.П. Сверхкритический диоксид углерода – «зеленый» растворитель для текстильной химии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. N 4. С. 5–20. DOI: 10.47367/0021-3497\_2024\_4\_5. EDN: FZCWGP.
- 15.** Киселев М.Г., Кумеева Т.Ю., Пуховский Ю.П. Применение сверхкритического диоксида углерода в текстильной промышленности // Российский химический журнал. 2002. Т. 46. N 1. С. 116–120. EDN: SFXDZP.
- 16.** Смоленцев Д.В., Гурин М.В., Венедиктов А.А., Евдокимов С.В., Фадеев Р.А. Получение ксеногенной костной крошки для имплантаций с помощью сверхкритической флюидной экстракции // Медицинская техника. 2019. N 4. С. 8–10.
- 17.** Голубев Э.В., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н.В. Разработка современных процессов сверхкритической сушки и стерилизации высокопористых материалов // Российский химический журнал. 2024. Т. 68. N 2. С. 93–100. DOI: 10.6060/rchj.2024682.13. EDN: NZRISY.
- 18.** Zheng Y., Huang Yu., Luo J., Peng X., Gui X., Liu G., et al. Supercritical fluid technology: a game-changer for biomacromolecular nanomedicine preparation and biomedical application // Chinese Chemical Letters. 2024. Vol. 35, no. 7. P. 109169. DOI: 10.1016/j.ccl.2023.109169.
- 19.** Nielsen K.A., Busby D.C., Glancy C.C., Hoy K.L., Kuo A.C., Lee Ch., et al. Spray application of low-VOC coatings using supercritical fluids // SAE Transactions. 1991. Vol. 100. P. 9–16.
- 20.** Дадашев М.Н., Магомедмирзоева Р.Г. Бузина черная перспективный источник для получения натурального пищевого красителя // Приоритетные научные исследования в области производства и переработки плодово-овощного сырья и винограда: сборник трудов Междунар. науч.-практ. конф. (г. Махачкала, 12–13 сентября 2023 г.). Махачкала: Издательство АЛЕФ, 2023. С. 297–303. EDN: RMSFBJ.
- 21.** Braga M.E.M., Gaspar M.C., de Sousa H.C. Supercritical fluid technology for agrifood materials processing // Current Opinion in Food Science. 2023. Vol. 50. P. 100983. DOI: 10.1016/j.cofs.2022.100983.
- 22.** Wang W., Rao L., Wu X., Wang Y., Zhao L., Liao X. Supercritical carbon dioxide applications in food processing // Food Engineering Reviews. 2021. Vol. 13. P. 570–591. DOI: 10.1007/s12393-020-09270-9.
- 23.** Меньшутина Н.В., Казеев И.В., Артемьев А.И., Бочарова О.А., Худеев И.И. Применение сверхкритической экстракции для выделения химических соединений // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. 2021. Т. 64. N 6. С. 4–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20216406.6405. EDN: XRSUD.
- 24.** Гайдукова А.А., Алексашина С.А. Методы экстрагирования биологически активных веществ и их применение в пищевой промышленности // Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Т. 71. N 1. С. 15–24. DOI: 10.48612/dalrybvtuz/2025-71-02. EDN: AZGJCI.
- 25.** Albabs D., Al-Momani I.F., Issa R., Yehya A. Multi-element determination of essential and toxic metals in green and roasted coffee beans: a comparative study among different origins using ICP-MS // Science Progress. 2021. Vol. 104, no. 2. P. 1–17. DOI: 10.1177/00368504211026162.
- 26.** Salami A., Asefi N., Kenari R.E., Gharekhani M.

Extraction of pumpkin peel extract using supercritical  $\text{CO}_2$  and subcritical water technology: enhancing oxidative stability of canola oil // Journal of Food Science and Technology. 2021. Vol. 58. P. 1101–1109. DOI: 10.1007/s13197-020-04624-x.

**27.** Ahangari H., King J.W., Ehsani A., Yousefi M. Supercritical fluid extraction of seed oils – a short review of current trends // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 111. P. 249–260. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.02.066.

**28.** Innovative and emerging technologies in the bio-marine food sector / eds M. Garcia-Vaquero, G. Rajauria. Academic Press, 2021. 500 p. DOI: 10.1016/C2019-0-01113-2.

**29.** Puha A.L., Stolyar A.L., Williams R.J. The fluid limit of an overloaded processor sharing queue // Mathematics of Operations Research. 2006. Vol. 31, no. 2. P. 316–350. DOI: 10.1287/moor.1050.0181.

**30.** Aguiar-Ricardo A., Vasco D.B., Bonifacio T.C., Correia V.G. Supercritical carbon dioxide design strategies: from drug carriers to soft killers // Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. Vol. 373, no. 2057. P. 1–16. DOI: 10.1098/rsta.2015.0009.

**31.** Федотов А.В., Володина А.А., Григорьев В.С., Романов И.В., Шембереев И.А. Энергоэффективная технология комплексной утилизации твердых и жидких органических отходов в сверхкритических условиях // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. N 1. С. 133–139. EDN: QHRZXB.

**32.** Абдуллагатов И.М., Алхасов А.Б., Догеев Г.Д., Тумалаев Н.Р., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б. [и др.]. Микроводоросли и их технологические применения в энергетике и защите окружающей среды // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. N 1. С. 166–183. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-1-166-183. EDN: YTMDJN.

**33.** Munshi P., Bhaduri S. Supercritical  $\text{CO}_2$ : a twenty-first century solvent for the chemical industry // Current Science. 2009. Vol. 97, no. 1. P. 63–72.

**34.** Kravanja K.A., Finšgar M., Knez Z., Knez M.K. Supercritical fluid technologies for the incorporation of synthetic and natural active compounds into materials for drug formulation and delivery // Pharmaceutics. 2022. Vol. 14, no. 8. P. 1670. DOI: 10.3390/pharmaceutics14081670.

**35.** Tran P., Park J.-S. Application of supercritical fluid technology for solid dispersion to enhance solubility and bioavailability of poorly water-soluble drugs // International Journal of Pharmaceutics. 2021. Vol. 610. P. 121247. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2021.121247.

**36.** Jambo H., Hubert P., Dispas A. Supercritical fluid chromatography for pharmaceutical quality control: current challenges and perspectives // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2022. Vol. 146. P. 116486. DOI: 10.1016/j.trac.2021.116486.

**37.** Islam T., Al Ragib A., Ferdosh S., Uddin A.B.M.H., Akanda J.H., Mia A.R., et al. Development of nanoparticles for pharmaceutical preparations using supercritical techniques // Chemical Engineering Communications. 2022. Vol. 209, no. 12. P. 1642–1663. DOI: 10.1080/00986445.2021.1983545.

**38.** Abdelbasset W.K., Elkholi S.M., Ismail K.A., Alalwani T.A.A.M., Hachem K., Mohamed A., et al. Modeling and computational study on prediction of pharmaceutical solubility in supercritical  $\text{CO}_2$  for manufacture of

nanomedicine for enhanced bioavailability // Journal of Molecular Liquids. 2022. Vol. 359. P. 119306. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.119306.

**39.** Penoy N., Grignard B., Evrard B., Piel G. A supercritical fluid technology for liposome production and comparison with the film hydration method // International Journal of Pharmaceutics. 2021. Vol. 592. P. 120093. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2020.120093.

**40.** Amani M., Ardestani N.S., Majd N.Y. Utilization of supercritical  $\text{CO}_2$  gas antisolvent (GAS) for production of Capecitabine nanoparticles as anti-cancer drug: Analysis and optimization of the process conditions // Journal of  $\text{CO}_2$  Utilization. 2021. Vol. 46. P. 101465. DOI: 10.1016/j.jcou.2021.101465.

**41.** Ha E.-S., Kang H.-T., Park H., Kim S., Kim M.-S. Advanced technology using supercritical fluid for particle production in pharmaceutical continuous manufacturing // Journal of Pharmaceutical Investigation. 2023. Vol. 53. P. 249–267. DOI: 10.1007/s40005-022-00601-y.

**42.** Chen L., Dean B., Liang X. A technical overview of supercritical fluid chromatography-mass spectrometry (SFC-MS) and its recent applications in pharmaceutical research and development // Drug Discovery Today: Technologies. 2021. Vol. 40. P. 69–75. DOI: 10.1016/j.ddtec.2021.10.002.

**43.** Killilea W.R., Hong G.T., Swallow K.C., Thomason T.B. Supercritical water oxidation: microgravity solids separation // SAE Transactions. 1988. DOI: 10.4271/881038.

**44.** Hicks M.C., Lauver R.W., Hegde U.G., Hall D.G., Sikora T.J. Gravity effects on premixed and diffusion limited supercritical water oxidation // SAE Transactions. 2005. Vol. 114. P. 509–517. DOI: 10.4271/2005-01-3036.

**45.** Федяева О.Н., Востриков А.А. Утилизация токсичных органических веществ в сверхкритической воде // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2012. Т. 7. N 1. С. 64–88. EDN: OTNMEH.

**46.** Залепугин Д.Ю., Карпов Н.А., Тилькунова Н.А., Ковальчук Ю.Л., Чернышова И.В., Семенова Т.А. Разработка метода импрегнации полимерных отходов в субкритическом фреоне R22 веществами, способствующими их биоразложению в естественной среде // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2019. Т. 14. N 2. С. 4–13. DOI: 10.34984/SCFTP.2019.14.2.001. EDN: JZFRNN.

**47.** 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. N 6. С. 157–165. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-157-165. EDN: DULTTK.

**48.** Гурин В., Титенко А., Старокадомский Д., Куз В., Демченко Л., Малоштан С. [и др.]. Комбинированная мобильная установка сверхкритической  $\text{CO}_2$ -экстракции // Кронос: естественные и технические науки. 2021. N 4. С. 16–23.

**49.** Бургунов О.В., Рубашкин М.В. Совершенствование промышленной политики России // Ученые записки Санкт-Петербургского имени В.Б. Бобкова филиала Российской таможенной академии. 2023. N 4. С. 64–68. EDN: DYGRRC.

**50.** Шинкевич А.И., Шогенов В.А. Некоторые аспекты обеспечения технологического суперинитета научно-про-

изводственного предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25. N 1. С. 23-27. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-23-27. EDN: XJCKAB.

**51.** Потапцева Е.В. Доказательная промышленная политика технологического суверенитета: сущность и содержание // Вестник экономики, права и социологии. 2025. N 1. С. 98-103. DOI: 10.24412/1998-5533-2025-1-98-103. EDN: RHOTQJ.

#### REFERENCES

- 1.** Zalepugin D.Yu., Tilkunova N.A., Chernyshova I.V., Polyakov V.S. Development of technologies based on supercritical fluids. *Sverkhkritischeskie flyuidy: teoriya i praktika*. 2006;1(1):27-51. (In Russian). EDN: KAOIPH.
- 2.** Fedyayeva O.N., Vostrikov A.A. Processing of pulp and paper industry wastes by supercritical water gasification (review). *Sverkhkritischeskie flyuidy: teoriya i praktika*. 2018;13(3):8-19. (In Russian). EDN: UWGAJU.
- 3.** Gumerov F.M., Zaripov Z.I., Mazanov S.V., Nakipov R.R., Khabriev I.Sh., Akhmetzyanov T.R., et al. Some characteristics of thermodynamic systems and their influence on the efficiency of recovery of valuable components from industrial wastewater of PJSC "Kazanorgsintez" using supercritical fluid extraction method. *Sverkhkritischeskie flyuidy: teoriya i praktika*. 2022;17(4):3-13. (In Russian). DOI: 10.34984/SCFTP.2022.17.4.001. EDN: HAOPHQ.
- 4.** Polevaya V.G., Vorobey A.M., Parenago O.O., Matson S.M. Chemical modification of poly(1-trimethylsilyl-1-propyne) in supercritical fluid media for the development of high-performance membrane materials. *Sverkhkritischeskie flyuidy: teoriya i praktika*. 2025;20(1):81-94. (In Russian). DOI: 10.34984/SCFTP.2025.20.1.007. EDN: TWIDFD.
- 5.** Dadashev M.N., Kobelev K.V., Vinokurov V.A., Filenko D.G., Magomedov Z.B., Dzhafarov R.F., et al. Prospects of applying the supercritical fluid technologies in different branches of the industry. *Monitoring. Science and Technologies*. 2017;1:74-83. (In Russian). EDN: YNCCPX.
- 6.** Dadashev M.N., Filchenko D.G., Grigoriev E.B., Svarovskaya N.A. Influence of formation permeability on oil recovery factor by supercritical carbon dioxide. *Monitoring. Science and Technologies*. 2024;3:14-18. (In Russian). DOI: 10.25714/MNT.2024.61.002. EDN: PUEKAW.
- 7.** Filenko D.G., Dadashev M.N., Vinokurov V.A., Grigor'ev E.B. Supercritical fluid technology in oil refining and petrochemistry. *Nauchno-tehnicheskii sbornik "Vesti gazovoi nauki"*. 2011;2:82-92. (In Russian). EDN: RTWYVB.
- 8.** Soldup Sh.N., Kotel'nikov V.I., Kara-sal B.K. Thermal dissolution of coals of chadan and mezhegey fields with benzene at supercritical conditions. In: *Materialy i tekhnologii XXI veka: sbornik trudov konf. = Materials and Technologies of the 21<sup>th</sup> century: Proc. Conf. Penza: Privilzhskii Dom znanii*; 2016, p. 222-228. (In Russian). EDN: WDQWBZ.
- 9.** Zhang A., Zhang Q., Bai H., Li L., Li J. Polymeric nanoporous materials fabricated with supercritical CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-expanded liquids. *Chemical Society Reviews*. 2014;43(20):6938-6953. DOI: C4CS00100A.
- 10.** Kang S.M., Unger A., Morrell J.J. The effect of supercritical carbon dioxide extraction on color retention and pesticide reduction of wooden artifacts. *Journal of the American Institute for Conservation*. 2004;43(2):151-160. DOI: 10.2307/4129650.
- 11.** Bogolitsyn K.G. Prospects in applying supercritical fluid technologies to the chemistry of raw plant material. *Sverkhkritischeskie flyuidy: teoriya i praktika*. 2007;2(1):16-27. (In Russian). EDN: KAOIUR.
- 12.** Ke J., Su W., Howdle S.M., George M.W., Cook D., Perdjon-Abel M., et al. Electrodeposition of metals from supercritical fluids. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2009;106(35):14768-14772. DOI: 10.1073/pnas.0901986106.
- 13.** Soshin S.A., Mazanov S.V., Khairutdinov V.F., Amirkhanov R.D., Gumerova F.M. Supercritical fluid technologies implemented on an industrial scale. *Herald of Technological University*. 2015;18(4):161-164. (In Russian). EDN: ROGWBX.
- 14.** Kumeeva T.Yu., Prorokova N.P. Supercritical carbon dioxide - "green" solvent for textile chemistry. *Textile Industry Technology (series "Proceedings of Higher Educational Institutions")*. 2024;4:5-20. (In Russian). DOI: 10.47367/0021-3497\_2024\_4\_5. EDN: FZCWGP.
- 15.** Kiselev M.G., Kumeeva T.Yu., Pukhovskii Yu.P. Application of supercritical carbon dioxide in the textile industry. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2002;46(1):116-120. (In Russian). EDN: SFXDZP.
- 16.** Smolentsev D.V., Gurin M.V., Venediktov A.A., Evdokimov S.V., Fadeev R.A. Obtaining xenogenic bone chips for implantations using supercritical fluid extraction. *Meditinskaya tekhnika*. 2019;4:8-10. (In Russian). EDN: SFXDZP.
- 17.** 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. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2024;68(2):93-100. (In Russian). DOI: 10.6060/rjc.2024682.13. EDN: NZRISY.
- 18.** Zheng Y., Huang Yu., Luo J., Peng X., Gui X., Liu G., et al. Supercritical fluid technology: a game-changer for biomacromolecular nanomedicine preparation and biomedical application. *Chinese Chemical Letters*. 2024;35(7):109169. DOI: 10.1016/j.clet.2023.109169.
- 19.** Nielsen K.A., Busby D.C., Glancy C.C., Hoy K.L., Kuo A.C., Lee Ch., et al. Spray application of low-VOC coatings using supercritical fluids. *SAE Transactions*. 1991;100:9-16.
- 20.** Dadashev M.N., Magomedmirzoeva R.G. Black elder a perspective source for obtaining natural food color. In: *Prioritetnye nauchnye issledovaniya v oblasti proizvodstva i pererabotki plodoovoshchnogo syr'ya i vinograda: sbornik trudov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Priority Scientific Research in the Field of Production and Processing of Fruit and Vegetable Raw Materials and Grapes: Proc. Int. Sci. Pract. Conf. 12-13 September 2023, Makhachkala. Makhachkala: ALEF; 2023, p. 297-303. (In Russian). EDN: RMSFBJ.*
- 21.** Braga M.E.M., Gaspar M.C., de Sousa H.C. Supercritical fluid technology for agrifood materials processing. *Current Opinion in Food Science*. 2023;50:100983. DOI: 10.1016/j.cofs.2022.100983.
- 22.** Wang W., Rao L., Wu X., Wang Y., Zhao L., Liao X. Supercritical carbon dioxide applications in food processing. *Food Engineering Reviews*. 2021;13:570-591. DOI: 10.1007/s12393-020-09270-9.
- 23.** Menshutina N.V., Kazeev I.V., Artemiev A.I.,

- Bocharova O.A., Khudeev I.I. Application of supercritical extraction for isolation of chemical compounds. *ChemChemTech.* 2021;64(6):4-19. (In Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216406.6405. EDN: XRSUD.
- 24.** Gaidukova A.A., Aleksashina S.A. Methods of extracting biologically active substances and their application in the food industry. *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University.* 2025;71(1):15-24. (In Russian). DOI: 10.48612/dalrybvtuz/2025-71-02. EDN: AZGJCI.
- 25.** Albals D., Al-Momani I.F., Issa R., Yehya A. Multi-element determination of essential and toxic metals in green and roasted coffee beans: a comparative study among different origins using ICP-MS. *Science Progress.* 2021;104(2):1-17. DOI: 10.1177/00368504211026162.
- 26.** Salami A., Asefi N., Kenari R.E., Gharekhani M. Extraction of pumpkin peel extract using supercritical  $\text{CO}_2$  and subcritical water technology: enhancing oxidative stability of canola oil. *Journal of Food Science and Technology.* 2021;58:1101-1109. DOI: 10.1007/s13197-020-04624-x.
- 27.** Ahangari H., King J.W., Ehsani A., Yousefi M. Supercritical fluid extraction of seed oils – a short review of current trends. *Trends in Food Science & Technology.* 2021;111:249-260. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.02.066.
- 28.** Garcia-Vaquero M., Rajauria G. Innovative and emerging technologies in the bio-marine food sector. Academic Press; 2021, 500 p. DOI: 10.1016/C2019-0-01113-2.
- 29.** Puha A.L., Stolyar A.L., Williams R.J. The fluid limit of an overloaded processor sharing queue. *Mathematics of Operations Research.* 2006;31(2):316-350. DOI: 10.1287/moor.1050.0181.
- 30.** Aguiar-Ricardo A., Vasco D.B., Bonifacio T.C., Correia V.G. Supercritical carbon dioxide design strategies: from drug carriers to soft killers. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 2015;373(2057):1-16. DOI: 10.1098/rsta.2015.0009.
- 31.** Fedotov A.V., Volodina A.A., Grigor'yev V.S., Romanov I.V., Shemberev I.A. Complex energy-efficient utilization technology of solid and liquid organic waste in supercritical conditions. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-industrial Complex.* 2019;1:133-139. (In Russian). EDN: QHRZXB.
- 32.** Abdulagatov I.M., Alkhasov A.B., Dogeev G.D., Tumalaev N.R., Aliev R.M., Badarov G.B., et al. Technological application of microalgae in power industry and environmental protection. *South of Russia: ecology, development.* 2018;13(1):166-183. (In Russian). DOI: 10.18470/1992-1098-2018-1-166-183. EDN: YTMDJN.
- 33.** Munshi P., Bhaduri S. Supercritical  $\text{CO}_2$ : a twenty-first century solvent for the chemical industry. *Current Science.* 2009;97(1):63-72.
- 34.** Kravanja K.A., Finšgar M., Knez Z., Knez M.K. Supercritical fluid technologies for the incorporation of synthetic and natural active compounds into materials for drug formulation and delivery. *Pharmaceutics.* 2022;14(8):1670. DOI: 10.3390/pharmaceutics14081670.
- 35.** Tran P., Park J.-S. Application of supercritical fluid technology for solid dispersion to enhance solubility and bioavailability of poorly water-soluble drugs. *International Journal of Pharmaceutics.* 2021;610:121247. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2021.121247.
- 36.** Jambo H., Hubert P., Dispas A. Supercritical fluid chromatography for pharmaceutical quality control: current challenges and perspectives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry.* 2022;146:116486. DOI: 10.1016/j.trac.2021.116486.
- 37.** Islam T., Al Ragib A., Ferdosh S., Uddin A.B.M.H., Akanda J.H., Mia A.R., et al. Development of nanoparticles for pharmaceutical preparations using supercritical techniques. *Chemical Engineering Communications.* 2022;209(12):1642-1663. DOI: 10.1080/00986445.2021.1983545.
- 38.** Abdelbasset W.K., Elkholi S.M., Ismail K.A., Alalwani T.A.A.M., Hachem K., Mohamed A., et al. Modeling and computational study on prediction of pharmaceutical solubility in supercritical  $\text{CO}_2$  for manufacture of nanomedicine for enhanced bioavailability. *Journal of Molecular Liquids.* 2022;359:119306. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.119306.
- 39.** Penoy N., Grignard B., Evrard B., Piel G. A supercritical fluid technology for liposome production and comparison with the film hydration method. *International Journal of Pharmaceutics.* 2021;592:120093. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2020.120093.
- 40.** Amani M., Ardestani N.S., Majd N.Y. Utilization of supercritical  $\text{CO}_2$  gas antisolvent (GAS) for production of Capecitabine nanoparticles as anti-cancer drug: Analysis and optimization of the process conditions. *Journal of  $\text{CO}_2$  Utilization.* 2021;46:101465. DOI: 10.1016/j.jcou.2021.101465.
- 41.** Ha E.-S., Kang H.-T., Park H., Kim S., Kim M.-S. Advanced technology using supercritical fluid for particle production in pharmaceutical continuous manufacturing. *Journal of Pharmaceutical Investigation.* 2023;53:249-267. DOI: 10.1007/s40005-022-00601-y.
- 42.** Chen L., Dean B., Liang X. A technical overview of supercritical fluid chromatography-mass spectrometry (SFC-MS) and its recent applications in pharmaceutical research and development. *Drug Discovery Today: Technologies.* 2021;40:69-75. DOI: 10.1016/j.ddtec.2021.10.002.
- 43.** Killilea W.R., Hong G.T., Swallow K.C., Thomason T.B. Supercritical water oxidation: microgravity solids separation. *SAE Transactions.* 1988. DOI: 10.4271/881038.
- 44.** Hicks M.C., Lauver R.W., Hegde U.G., Hall D.G., Sikora T.J. Gravity effects on premixed and diffusion limited supercritical water oxidation. *SAE Transactions.* 2005;114:509-517. DOI: 10.4271/2005-01-3036.
- 45.** Fedyayeva O.N., Vostrikov A.A. Destruction of hazardous organic substances in supercritical water. *Sverkhkriticheskie flyuidy: teoriya i praktika.* 2012;7(1):64-88. (In Russian). EDN: OTNMEH.
- 46.** Zalepuhin D.Yu., Karpov V.A., Tilkunova N.A., Kovalchuk Yu.L., Chernyshova I.V., Semenova T.A. Development of polymer waste impregnation method in subcritical freon R22 media with substances promoting their biodegradation in nature. *Sverkhkriticheskie flyuidy: teoriya i praktika.* 2019;14(2):4-13. (In Russian). DOI: 10.34984/SCFTP.2019.14.2.001. EDN: JZFRNN.
- 47.** 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. (In Russian). DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-157-165. EDN: DULTTK.

**48.** Gurin V., Titenko A., Starokadomsky D., Kutz V., Demchenko L., Maloshtan S., et al. Combined mobile installation of supercritical CO<sub>2</sub> extraction. *Chronos: natural and technical sciences*. 2021;4:16-23. (In Russian).

**49.** Burgonov O.V., Rubashkin M.V. Improving Russia's industrial policy. *Uchenye zapiski Sankt-Peterburgskogo imeni V.B. Bobkova filiala Rossiiskoi tamozhennoi akademii*. 2023;4:64-68. (In Russian). EDN: DYGRRC.

**50.** Shinkevich A.I., Shogenov V.A. Some aspects of

ensuring the technological sovereignty of a scientific and production enterprise. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023;25(1):23-27. (In Russian). DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-23-27. EDN: XJCKAB.

**51.** Potaptseva E.V. Evidence-based industrial policy of technological sovereignty: essence and content. *Vestnik ekonomiki, prava i sotsiologii*. 2025;1:98-103. (In Russian). DOI: 10.24412/1998-5533-2025-1-98-103. EDN: RHOTQJ.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Дадашев Мирали Нуралиевич,

д.т.н., профессор,  
Российский государственный университет  
нефти и газа (национальный исследовательский  
университет) имени И.М. Губкина,  
119991, г. Москва, Ленинский проспект, 65,  
Российская Федерация,  
jnus@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6811-3376>

### Вклад автора

Автор выполнил исследовательскую работу,  
на основании полученных результатов  
провел обобщение, подготовил рукопись  
к печати.

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии  
конфликта интересов.

Автор прочел и одобрил окончательный  
вариант рукописи.

### Информация о статье

Поступила в редакцию 12.08.2025.  
Одобрена после рецензирования 22.09.2025.  
Принята к публикации 17.10.2025.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Mirali N. Dadashov,

Dr. Sci. (Engineering), Professor,  
Gubkin Russian State University  
of Oil and Gas (National University),  
65, Leninsky Ave., Moscow, 119991,  
Russian Federation,  
jnus@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6811-3376>

### Contribution of the author

The author performed the research, made  
a generalization on the basis of the results  
obtained and prepared the manuscript  
for publication.

### Conflict of interest

The author declares no conflict of interests  
regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved  
by the author.*

### Information about the article

*The article was submitted 12.08.2025.  
Approved after reviewing 22.09.2025.  
Accepted for publication 17.10.2025.*