

ТЕХНОЛОГИИ БОРЬБЫ С НЕФТЯНЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКЕ

ЛИ ЦИ

(Хуанганский профессионально-технический институт, провинция Хубэй, КНР)

канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

На основе системного подхода изучены технологии борьбы с нефтяным загрязнением окружающей среды в Китае, детально исследованы методы очистки загрязненных нефтью почв, способы очистки загрязненных водоемов, а также применяемые нефтяные сорбенты. При очистке грунтовых и подземных вод от нефтяных загрязнений широко используются полупроницаемые мембраны, технологии обратного осмоса и сорбционные материалы. Очистка загрязненной нефтью почвы осуществляется при помощи технологий биоремедиации с использованием микроорганизмов, технологий физико-химического восстановления почв, а также комбинирования данных методов. Выполненный анализ позволил определить возможные пути совершенствования технологий борьбы с нефтяным загрязнением, которые направлены на снижение затрат; сокращение цикла очистки; возможности многократного использования реагентов и минимальным образованием не утилизируемых отходов; уменьшение риска вторичного загрязнения; возможности совместного восстановления загрязненной почвы и грунтовых вод; оптимизацию производства эффективных и многофункциональных материалов с широким диапазоном применения в различных условиях окружающей среды; определения механизмов взаимодействия реагентов и сорбентов с поллютантами; увеличение уровня интеллектуализации и роботизации применяемого оборудования с целью повышения безопасности труда работников, осуществляющих очистку поверхности воды и почвы от загрязнений нефтью и нефтепродуктами.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение, очистка воды и почвы, биоремедиация, физико-химический метод восстановления, нефтяной сорбент.

Введение. Одной из наиболее быстро развивающихся стран мира в настоящее время является Китайская Народная Республика (КНР), которая занимает второе место по импорту нефти в мире¹. В 2025 г. общее потребление нефти в КНР составило 780 млн т, в т.ч. импорт – 520 млн т. Около 33% потребляемых углеводородов нефти добывается на территории Китая, где разведано около 500 нефтегазовых бассейнов¹. Перспективные месторождения нефти и газа в КНР приведены на рисунке¹.



Рисунок. – Перспективные месторождения нефти и газа в КНР¹

¹ Energy Information Administration. AIR: Advanced Resources International Inc. 2013. – URL: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2013).pdf)

Однако, несмотря на важное значение нефтяной отрасли в экономике Китая, производственные процессы добычи, транспортировки, хранения и переработки нефти вызвали беспрецедентное загрязнение окружающей среды, к примеру, за период с 2024 по 2025 гг. произошло в общей сложности 136 случаев крупных разливов нефти, что привело к загрязнению почв на площади 28 000 га и загрязнению воды на площади 12 тыс. км², что представляет серьезную угрозу для почвенной и водной экосистем. В связи с этим на первый план социального развития КНР поставлено решение проблем контроля и борьбы нефтяным загрязнением окружающей среды.

Нефтяные загрязнители содержат токсичные компоненты, такие как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), бензол и его гомологи, что обусловлено высоким риском для населения. Как в почве, так и в водных объектах ПАУ устойчивы к химической и биологической трансформации и характеризуются высокой миграционной активностью. В водоемах ПАУ сорбируются взвешенными частицами, оседают и накапливаются в донных отложениях, что способствует включению ПАУ в пищевые цепи гидробионтов [1]. Поступление ПАУ в почву вызывает изменение ее физико-химических и биологических свойств, снижение либо полную утрату плодородия. Индивидуальные ПАУ нефтяного генеза, а также продукты их деградации и биотрансформации обладают тройными эффектами: канцерогенными, тератогенными и мутагенными свойствами, оказывающими негативное влияние на природные экосистемы, не только разрушая экологическую среду, но и ставя под угрозу здоровье человека из-за риска попадания в пищевые цепочки [2–5]. Анализ уровня загрязнения почв ПАУ нефтяного генеза в КНР показал, что в некоторых регионах регистрируется превышение допустимых норм, в частности, на северо-западе КНР в провинции Шэньси общий уровень загрязнения почвы по 16 видам ПАУ достигает от 554,10 нг/г (слабозагрязненная почва) до 5516,73 нг/г (сильнозагрязненная почва) [6]. Содержание нефтяных углеводородов в подземных водах на самом крупном нефтяном месторождении КНР – Дацин – составляет в среднем 5,26 мг/л, что значительно превышает предельно допустимые нормы. До 70% загрязнения почвы на нефтяном месторождении Дацин вызвано разливами сырой нефти в процессах ее добычи.

Транспортировка нефтяного сырья также является значительным источником загрязнения экосистем, в среднем регистрируется 1–2 разлива нефти на 100 км китайско-российского нефтепровода. Процессы хранения нефтяного сырья нефтеперерабатывающими и химическими компаниями характеризуются риском утечек около 5–10 т сырой нефти ежегодно.

Кроме того, переработка нефти нефтеперерабатывающими и химическими предприятиями связана с образованием около 1,2 млрд т нефтесодержащих сточных вод, требующих глубокой очистки. Определено, что при использовании нефтепродуктов до 60% городских автозаправочных станций подвержены риску их утечек из резервуаров хранения.

Выполненный анализ зон загрязнения нефти показал региональные особенности распределения их концентрации: значительное загрязнение сырой нефтью преобладает на северо-востоке и северо-западе КНР, где расположены крупные нефтяные месторождения; а в районах нефтепереработки и химической промышленности, таких как дельта реки Янцзы, наблюдается комплексное загрязнение. При этом уровень нефтяного загрязнения на севере Китая выше, чем на юге, а загрязнение подземных вод выше, чем поверхностных.

К концу 2025 г. в Китае общая площадь загрязненных нефтью почв достигала 86 000 га, при этом на долю слабого, умеренного и сильного загрязнения приходится 60,5%, 32,6% и 6,9% соответственно; избыточная доля поверхностных вод, загрязненных нефтью, составит 4,2%, а площадь загрязнения нефтью подземных вод составит 43 тыс. м². Опасный уровень нефтяного загрязнения обуславливает высокий риск экологического ущерба, связанного с деградацией растительности, потерей плодородия почв, гибелью живых организмов; риском повреждения здоровья населения, развитием онкологии, кожных заболеваний, отравлений и серьезных экономических потерь (ежегодное производство сельскохозяйственной продукции сокращается на 5 млрд юаней, а расходы на борьбу с загрязнением превышают 100 млрд юаней).

В настоящее время Китай включил меры по борьбе с нефтяным загрязнением в свою национальную стратегию развития и поставил цели по восстановлению почв на уровне более 85% и соблюдению требований к очистке нефтесодержащих сточных вод на уровне более 98% к концу 2026 г. В связи с этим комплексное исследование доступных и эффективных технологий борьбы с нефтяным загрязнением окружающей среды в КНР является актуальной научной задачей, что и определило *цель настоящего исследования*.

Методы исследования. Применялись теоретические методы исследования (сравнение, классификация, системный анализ и обобщение) достижений ученых в области технологий очистки от нефтяных загрязнений воды и почвы на территории КНР с целью определения границ исследований в этой области и систематизации в контексте технологического развития. Исследование направлено на углубленное изучение трех аспектов: методов очистки загрязненных нефтью почв, способов очистки загрязненных водоемов, а также типов и областей применения нефтяных сорбентов различного происхождения.

Результаты и их обсуждение. Выполненный анализ научных исследований в области разработки эффективных методов очистки загрязненных нефтью почв на примере КНР показал, что они в основном сосредоточены на следующих направлениях: разработке технологий биоремедиации с использованием микроорганизмов, совершенствования технологий физико-химического восстановления почв, а также комбинирования данных методов [6–22]. Для целей микробиологической ремедиации нефтезагрязненных почв наиболее подробно описаны в научной литературе такие высокоэффективные разрушающие штаммы, как *Pseudomonas*

и *Acinetobacter*, выполнен глубокий анализ конечных продуктов метаболизма нефти в почве, изучены ферментативные механизмы. Для целей фиторемедиации научным сообществом проведен отбор сортов растений с высокой устойчивостью к загрязнению и разработаны системы восстановления нефтезагрязненных почв, в частности, водно-болотные растения (такие как тростник и рогоз) широко используются для восстановления водоемов, корневые выделения этих растений стимулируют активность микроорганизмов ризосферы, специализированных бактерий, обеспечивающих синергетическую деградацию нефтепродуктов. Микоризные грибы, ассоциированные с корнями растений, значительно расширяют зону влияния фиторемедиации.

В целом, в области разработки эффективных методов очистки загрязненных нефтью почв в КНР доминирующее положение занимают технологии биоремедиации с использованием микроорганизмов. В частности, Ли Пэйцзюнь и Сунь Тьенг добились серьезных результатов исследований в области биоремедиации и микробиологического восстановления загрязненных нефтью почв в Китае и создали систематизированную теоретическую базу, необходимую для практического использования [14]. Чжу Вэй также предложил способ совершенствования технологии биологической очистки загрязненных нефтью и шламами почв и представил справочные данные для дальнейших исследований в этой области, сформулировал основные принципы и способы практического применения предлагаемой технологии биологической очистки [16]. Использование ресурсов ила при разработке технологии биоремедиации загрязненных нефтью почв занимаются Чжэн Юаньян, Е Вэйминь и Чэнь Юдао, что позволило достичь двойной цели – удалить загрязняющие вещества и осуществить рекуперацию ресурсов [21].

Такие ученые, как Гао Хуан, Цай Мэнменг, Ни Гуаньюань, Дин Кэцян и Ван Лицзин, провели углубленное исследование характеристик проникновения влаги и динамики микробиологической деградации нефтезагрязненной почвы, выявив влияние концентрации загрязняющих веществ, структуры почвы, условий влажности и других факторов на эффективность деградации нефти [6–8].

Ван Хаою, Сюй Дэган, Лю Цзянь и др. использовали методы молекулярной биологии для анализа структуры и эволюции микробных сообществ в загрязненной нефтью почве, что обеспечило теоретическую основу для целенаправленного регулирования микробных сообществ [13; 15]. К примеру, степень очистки при микробиологическом восстановлении почв с 14-дневной скоростью разложения нефтяных углеводородов в деградированной флоре нефтяного месторождения Даганг составляет 96%, при этом при 3-дневной скорости разложения высокоэффективными разрушающими штаммами *Acinetobacter Qiongsi* и *Erythrococcus Qingsheng* составляет 91–92%; а отдельные виды штамма рода *Pseudomonas* в Северной Шэньси помогли увеличить скорость разложения ПАУ до 37,1%.

В области фиторемедиации Жэнь Лэй и Хуан Тинлинь [17] изучали влияние нефтяного загрязнения на рост и развитие растений, а также механизм толерантности растений; Ли Фаньсю, Сяо Яо [20], Чжан Чжэньмин и соавторы [18] и Лю Чжэ [12] добились значительного прогресса в создании совместной системы восстановления растений и микроорганизмов и подобрали комбинацию восстановительных способов, подходящих для различных климатических регионов Китая. Технологии фиторемедиации позволили эффективно разрушить ПАУ и восстановить почву в дельте реки Хуанхэ, при этом скорость деградации составила 77,5% за 80 дней; за 120 дней – 77,8%, что значительно выше, чем при использовании только технологии биоремедиации.

Ряд авторов исследуют особенности восстановления нефтяного загрязнения в солончаково-щелочных районах КНР. Большинство основных районов нефтедобычи в Китае расположены именно в солончаковых районах, которые характеризуются определенными особенностями восстановления загрязненных нефтью почв. Ни Гуаньюань, Нин Вэнь и др. изучили механизм адаптации микроорганизмов к разложению нефтяных углеводородов в условиях соляно-щелочной среды и отобрали высокоэффективные штаммы, устойчивые к воздействию соли и щелочей, которые технически эффективны в борьбе с нефтяным загрязнением в соляно-щелочных районах [5; 15].

В области совершенствования технологий физико-химического восстановления почв исследования сосредоточены на развитии передовых процессов окисления (Advanced Oxidation Processes (AOPs)). В частности, активация персульфатом и метод окисления реактивом Фентона (ЭК-фентон) значительно повысили эффективность удаления труднорастворимых нефтяных углеводородов [11; 23]. В работе Ли Цзя, Цао Синтао и Суй Хун приведен систематический обзор технологии физико-химического восстановления загрязненных нефтью почв в КНР и за рубежом, выполнен анализ применимых условий, преимуществ и недостатков различных технологий [19].

В частности, на нефтяном месторождении Дацин используется физико-химический метод восстановления почв на основе термической десорбции и каталитического пиролиза, который включает обработку в течение 40 мин смесью рамнолипидов и силиката натрия (соотношением 200:700) при 60 °С и дозировкой 1% на сырье; высокотемпературную промывку при 550 °С, центробежное обезвоживание и каталитический пиролиз на оксиде кальция, остаточное содержание нефти менее 3% масс., полный цикл восстановления почвы занимает 20 дней, стоимость данной обработки 1522 юаней за тонну загрязненного сырья [19].

В одной из технологий химического окисления загрязненных почв применен композитный катализатор на основе наночастиц железа и графена для активации персульфатом, содержание нефтепродуктов снижается с 8000 мг/кг до менее чем 100 мг/кг, а стоимость обработки составляет 500 юаней за тонну загрязненного сырья

[19]. Также предложена технология химического окисления нефтезагрязненных почв сочетающая преимущества озона и перекиси водорода, которая обеспечивает удаление ПАУ более чем на 85% [19]. В технологии химического восстановления модифицированный железо-бентонитовый композитный восстановитель обеспечивает 90%-е удаление серосодержащих загрязняющих веществ, стоимость обработки составляет 300 юаней за тонну загрязненного сырья [19].

Другая технология использует метод выщелачивания почвы комплексным реагентом из биологических поверхностно-активных веществ в сочетании с массообменными процессами распыления–замачивания–центрифугирования и обеспечивает содержание нефтепродуктов в умеренно загрязненной почве на нефтяном месторождении Дацин после восстановления на уровне менее 200 мг/кг, а стоимость данной обработки составляет около 50 юаней за 1 м² [19].

Существует технология отверждения и стабилизации нефтезагрязненных почв: норма расхода композитного отвердителя на основе твердых промышленных отходов составляет 92%, а стоимость – 66,7% от стоимости традиционного цементного отвердителя; фиксированная норма расхода композитного стабилизатора на основе отходов агролесомелиорации составляет 88%. Данная технология позволяет повысить плодородие загрязненных почв [19].

Крупнейший в мире по мощности переработчик нефти – китайская компания Sinopec, успешно внедрила комбинированную технологию «Химическое окисление – биологическая синергия», сочетающую как биоремедиацию, так и методы физико-химического восстановления почв для обработки загрязненных участков в реальных условиях провинции Хэнань.

Комбинированные электрохимические окислительные методы обработки (ЕК-ISCO) низкопроницаемых почв характеризуются высокой скоростью удаления нефтяного загрязнения и составляют около 89% за 1 ч обработки. При комбинированной химической окислительно-микробиологической обработке (ISCO-Bio) скорость удаления углеводов увеличивается на 11%; при комбинированной растительно-микробиологической биоуглеродной восстановительной обработке скорость разложения составляет 75%/ в час [19].

Технологии термической обработки (такие как термическая десорбция, пиролиз и сжигание) подходят для быстрой очистки загрязненных нефтью участков почв с высокой концентрацией поллютанта. Однако данные методы требуют значительных энергозатрат и характеризуются высоким риском вторичного загрязнения экосистемы продуктами сгорания и пиролиза. Методы термохимической промывки и коагуляционной обработки применяются при утилизации нефтяных шламов на нефтеперерабатывающих предприятиях Китая.

Анализ доступных технологий очистки загрязненных нефтью водных объектов в Китае показал, что широко используется при очистке грунтовых и подземных вод полунепроницаемые мембраны, технологии обратного осмоса (Osmotic reaction wall, мембранный канал Януса и т.п.) и сорбционные материалы, такие как железо с нулевой валентностью и активированный уголь, наноксиды с высокой удельной поверхностью и реакционной способностью; исследуются новые технологии, в частности, биоэлектрохимические системы, сочетающие разложение органического вещества с выработкой электроэнергии [23–27]. К примеру, использование физического метода разделения углеводов нефтяного генеза и воды технологией обратного осмоса при помощи супергидрофобной и суперолеофильной разделительной мембраны можно достичь эффективности разделения более 99% с расходом загрязненной воды до 5000 л/(м²·ч).

Перспективна технология интегрированной инновационной воздушной флотации – процесса адсорбционно-мембранной фильтрации, который очищает нефтеперерабатывающие и химические нефтесодержащие сточные воды до остаточного содержания углеводов нефтяного генеза менее 0,1 мг/л. Передовая технология химической обработки загрязненных нефтью водных объектов деэмульгаторами обеспечивает степень связывания с ПАУ, бензолом и его гомологами до 90%; при этом степень извлечения нефтепродуктов из осадка с химическим деэмульгатором превышает 75%. Комбинация электропроницаемых реакционных стенок (ЕК-PRB) обеспечивает эффективность удаления углеводов нефтяного генеза более чем на 69,9%; комбинация многофазной экстракции и химического окисления (МРЕ-ISCO) позволяет снизить концентрацию загрязненных бензолом грунтовых вод до стандартного уровня. Таким образом, электрокомбинированная микробиологическая очистка оказывает значительное влияние на удаление бензола и полициклических ароматических углеводов из водных объектов.

Технологии создания искусственных водно-болотных угодий из загрязненных нефтью водных объектов (морских и прибрежных водоемов) характеризуются низкой стоимостью и хорошими экологическими преимуществами. Отработана технология биологической очистки деградировавшей флоры морских нефтяных месторождений на шельфе залива Бохай, которая обрабатывалась в биопленочном реакторе в искусственных водно-болотных угодьях. Степень разрушения сырой нефти бактериями –нефтедеструкторами в течение 30 дней составила 100% (концентрация нефти в водоеме после очистки менее 0,05мг/л).

Сточные воды нефтеперерабатывающих заводов и нефтесодержащие сточные воды химической промышленности КНР очищаются комбинированными технологическими процессам, зачастую используется четырехступенчатый процесс, включающий последовательные этапы очистки: гравитационное разделение → воздушная флотация → адсорбция → мембранная фильтрация. Такие сточные воды соответствуют стандарту III категории поверхностных вод с коэффициентом повторного использования воды более 80%.

В технологиях ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с утечками углеводородов нефтяного генеза, как с водной поверхности, так и с почвы широкое распространение получили нефтяные сорбенты [28–30]. В Китае используются различные по природе сорбционные материалы, неорганические сорбенты; органические сорбенты, полученные из биомассы; полимерные сорбенты, нанокompозитные сорбенты и их модификации [31–33]. К примеру, степень удаления нефтяных углеводородов комбинированным сорбентом на основе активированного угля и бентонита составляет 40–80%; адсорбционная способность по отношению к углеводородам нефти летучей золы и стального шлака после модификации составляет 0,3–0,6 г/г; композитные сорбенты на основе твердых промышленных отходов обеспечивают как вторичное использование отходов, так и очистку загрязненной почвы и нефтесодержащих сточных вод. Органические сорбенты, полученные из отходов агролесомелиорации, показывают высокие значения по нефтеемкости: к примеру, адсорбционная способность модифицированных кукурузных стеблей по сырой нефти составляет 15,6 г/г, что на 136,6% выше, чем у не модифицированных отходов обработки кукурузы [31]; адсорбционная способность гидрофобного модифицированного аэрогеля из целлюлозы на основе отходов агролесомелиорации по отношению к сырой нефти составляет 80,2 г/г, по отношению к дизельному топливу – 59,2 г/г и достигает равновесного состояния за 5 мин [33]; адсорбционная способность биоугля из рисовой шелухи, подвергнутой пиролизу, при температуре 450 °С составляет 3,2 г/г; модифицированный лауриновой кислотой сосновый биоуголь достигает краевого угла смачивания с водой 133,5°, а сырая нефть адсорбируется за 60 мин при нефтеемкости 5,3 г/г [33]. Адсорбционная способность нанокompозитных сорбентов на основе графена с магнитными фазами к сырой нефти составляет 0,5–1,2 г/г, при этом благодаря магнитному разделению возможно повторное использование 85% сорбционного материала. Использование на практике обработанного комбинированного сорбента на основе соломы, биоугля, мочевины и райграса позволило очистить почву в дельте реки Хуанхэ на 77,5% за 80 дней. Органические полимерные сорбенты из углеродных нанотрубок на основе лигнина разлагается при фототермическом воздействии и подходит для ликвидации разливов нефти на море; супергидрофобная олеофильная губка способна поглощает сырую нефть в десятки раз больше, чем ее собственная масса. Модифицированный пенополиуретан способен полностью удалить дизельное топлива с поверхности воды за 6 дней. В целом, эффективность технологии очистки почвы сорбционными материалами в Китае составит 75–98%, нефтесодержащих вод – до 97,8%. Вместе с тем традиционные сорбенты на основе биомассы замещаются нанокompозитными материалами, которые позволят повысить степень очистки воды и обеспечить содержание нефтепродуктов менее 0,1 мг/л.

Заключение. В работе на основе системного подхода изучены технологии борьбы с нефтяным загрязнением окружающей среды в КНР, комплексно исследованы методы очистки загрязненных нефтью почв, способы очистки загрязненных водоемов, а также применяемые нефтяные сорбенты.

Определено, что очистка загрязненной нефтью почвы в основном осуществляется при помощи технологий биоремедиации с использованием микроорганизмов, технологий физико-химического восстановления почв, а также комбинирования данных методов. Технология биоремедиации широко распространена из-за ее низкой стоимости и экологичности. Однако существует ряд ограничений, таких как длительные сроки восстановления загрязненных объектов и значительная зависимость от температуры и других условий окружающей среды.

При очистке грунтовых и подземных вод от нефтяных загрязнений широко используются полупроницаемые мембраны, технологии обратного осмоса и сорбционные материалы. Технологии физико-химического восстановления являются высокоэффективными, но дорогостоящими, и вместе с тем подходят для экстренной обработки сильно загрязненных объектов.

Интеграция и комбинирование различных технологий определяют тенденции развития перспективных методов борьбы с загрязнениями и возможности их технической реализации в промышленных масштабах в условиях КНР. Следует отметить, что неправильный выбор технологии борьбы с нефтяным загрязнением может привести к избыточным капитальным и операционным затратам и вторичному загрязнению окружающей среды.

Выполненный анализ позволил определить возможные пути совершенствования технологий борьбы с нефтяным загрязнением окружающей среды в КНР, которые направлены на снижение затрат; сокращение цикла очистки; возможности многократного использования реагентов и минимальным образованием не утилизируемых отходов; уменьшение риска вторичного загрязнения; возможности совместного восстановления загрязненной почвы и грунтовых вод; оптимизацию производства эффективных и многофункциональных материалов с широким диапазоном применения в различных условиях окружающей среды; определения механизмов взаимодействия реагентов и сорбционных материалов с поллютантами; увеличение уровня интеллектуализации и роботизации применяемого оборудования с целью повышения безопасности труда работников, осуществляющих очистку поверхности воды и почвы от загрязнений нефтью и нефтепродуктами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никаноров А.М., Страдомская А.Г. Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем. – Ростов на/Д: НОК, 2008. – 222 с.
2. Yu H. Environmental carcinogenic polycyclic hydrocarbons: photochemistry and phototoxicity // J. Environ. Sci. Health Part C – Environ. Carcinog. Ecotoxicol. Rev. – 2002. – V. 20 (2). – P. 149–183.

3. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the dissolved phase, particulate matter, and sediment of the Sele River, Southern Italy: a focus on distribution, risk assessment, and sources / P. Montuori, E. De Rosa, F. Di Duca, B. De Simone, S. Scipia, I. Russo, P. Sarnacchiaro, M. Triassi // *Toxics*. – 2022. – V. 10. – 401.
4. PAHs in the surface water and sediments of the middle and lower reaches of the Han River, China: occurrence, source, and probabilistic risk assessment / L. Dong, L. Lin, J. He, X. Pan, X. Wu, Y. Yang, Z. Jing, S. Zhang, G. Yin // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2022. – V. 164. – P. 208–218.
5. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water and bottom sediments of a shallow, lowland dammed reservoir (on the example of the reservoir Blachownia, South Poland) / A. Pohl, M. Kostecki, I. Jureczko, M. Czaplicka, B. Łozowski // *Archives of Environmental Protection*. – 2018. – V. 44. – P. 10–23.
6. 高欢. 陕北石油污染土壤中多环芳烃的微生态响应及联合生物修复机制研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024. Гао Хуан. Исследование микробиологической реакции и комбинированного механизма биоремедиации полициклических ароматических углеводородов в загрязненной нефтью почве на севере провинции Шэньси. – Сиань: Сианьский ун-т архитектуры и технологий, 2024.
7. 蔡蒙蒙. 改性浒苔聚氨酯固定化菌剂在海洋溢油污染中的应用研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2023. Цай Мэнменг. Исследование применения модифицированных полиуретаном бактерий, иммобилизованных на основе *Hu moss*, при загрязнении морской среды разливами нефти. – Циндао: Шаньдунский ун-т науки и техники, 2023.
8. 倪广元. 大庆油田落地油污污染场土壤/地下水修复技术研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2020. Ни Гуанъюань. Исследование технологии восстановления почвы/грунтовых вод на месте нефтяного загрязнения Дацинского нефтяного месторождения. – Дацин: Северо-Восточный нефтяной ун-т, 2020.
9. Adhikari K, Hartemink A E. Linking soils to ecosystem service: a global review // *Geoderma*, 2016.– № 262–P. 101–111.
10. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: a review / I. C. Ossai, A. Ahmed, A. Hassan et al. // *J. Environmental Technology & Innovation*. – 2020. – № 17. – P. 100526.
11. 周慧娣, 等. 石化场地污染土壤和地下水修复技术组合研究与应用进展 [J]. 天津科技大学学报, 2024. Прогресс в исследованиях и применении комбинации технологий восстановления загрязненных почв и грунтовых вод на нефтехимических предприятиях / Чжоу Хуэйди и др. // Журнал Тяньцзиньского университета науки и техники, 2024.
12. 刘喆. 生物炭促进植物修复石油污染土壤的作用机制 [D]. 济南: 山东大学, 2023. Лю Чжэ. Изучен механизм действия биоугля, способствующего фиторемедиации нефтезагрязненной почвы. – Цзинань: Шаньдунский ун-т, 2023.
13. 王浩宇. 石油烃高效降解菌的分离及其强化石油污染土壤修复研究. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022. Ван Хаюю. Исследования по выделению эффективных бактерий, способных разлагать нефтяные углеводороды, и их усилению при рекультивации загрязненных нефтью почв. – Пекин: Китайский ун-т горного дела и технологий (Пекин), 2022.
14. 叶为民, 孙风慧. 2002. 土壤石油污染的生物修复技术. 上海地质, 2002. Ли Пэйцзюнь, Сунь Тьенг. Технология биоремедиации при нефтяном загрязнении почв // Шанхайская геология. – 2002. – № 23(4). – P. 22–24.
15. 许德刚, 李巨峰, 张坤峰. 石油污染土壤修复技术进展 [J]. 生产与环境, 2014. Сюй Дэган, Ли Цзюйфэн, Чжан Куньфэн. Прогресс в технологии восстановления нефтезагрязненных почв // Производство и окружающая среда. – 2014. – № 14. – P. 3–5.
16. 祝威. 石油污染土壤和油泥生物处理技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2010. Чжу Вэй. Технология биологической очистки нефтезагрязненных почв и шламов. – Пекин: Sinopec Press, 2010. – P. 5–8.
17. 任磊, 黄廷林. 土壤的石油污染 [J]. 农业环境保护, 2000, Жэнь Лэй, Хуан Тинлинь. Нефтяное загрязнение почвы // Охрана окружающей среды в сельском хозяйстве. – 2000. – № 19(6). – P. 360–363.
18. 张珍明, 林昌虎, 何腾兵, 等. 浅析石油污染土壤的微生物修复研究现状. 贵州科学, 2010. Краткий анализ состояния исследований по микробиологическому восстановлению нефтезагрязненной почвы / Чжан Чжэньмин, Линь Чанху, Хэ Тэнбин и др. // Наука Гуйчжоу. – 2010. – № 28(3). – P. 76–81.
19. 李佳, 曹兴涛, 隋红. 石油污染土壤修复技术研究现状与展望 [J]. 石油学报, 2017. Ли Цзя, Цао Синтао, Суй Хун. Состояние исследований и перспективы технологии восстановления нефтезагрязненных почв // Нефтяной журнал. – 2017. – № 33(5). – P. 812–833.
20. 李凡峰, 肖遥. 含油污泥混凝处理实验研究. 石油与天然气化工, 2000. Ли Фаньсю, Сяо Яо. Экспериментальные исследования по коагуляционной обработке нефтесодержащих шламов // Химическая промышленность нефти и природного газа. – 2000. – № 29(4). – P. 211–213.
21. 郑远扬编译. 石油污染生化治理的进展. 国外环境科学技术, 1993. Чжэн Юаньян. Прогресс в области биохимической очистки нефтяных загрязнений // Зарубежная экологическая наука и техника. – 1993. – № 3 – P. 46–50.
22. Venny, Suyin Gan, Hoon Kiat Ng. Current status and prospects of Fenton oxidation for the decontamination of persistent organic pollutants (POPs) in soils // *Chemical Engineering*. – 2012. – № 213. – P. 295–317.
23. 李照, 等. 海洋溢油污染及修复技术研究进展 [J]. 山东建筑大学学报, 2020. Ход исследований в области технологии ликвидации последствий разливов нефти в море / Ли Чжао и др. // Журнал Шаньдунского университета архитектуры и технологий, 2020.
24. 李云锋. 石油污染水体的治理方法. 环境与发展, 2014. Ли Юньфэн. Методы очистки водных объектов, загрязненных нефтью // Окружающая среда и развитие. – 2014. – № 26(4). – P. 91–94.
25. 张秦川, 王泰旭, 马勇, 等. 生物技术在含油废水处理中的应用研究进展. 科技与企业, 2013. Прогресс в исследованиях по применению биотехнологий для очистки нефтесодержащих сточных вод / Чжан Циньчуань, Ван Тайсю, Ма Юн и др. // Технологии и предпринимательство. – 2013. – № 16. – P. 301.
26. Review of technologies for oil and gas produced water treatment / F. R. Ahmadun, A. Pendashteh, L. C. Abdullah et al. // *Journal of Hazardous Materials*, 2009, – № 170(2/3) – P. 530–551.

27. Increasing intracellular releasable electrons dramatically enhances bioelectricity output in microbial fuel cells / Y. C. Yong, Y. Y. Yu, Y. Yang et al. // *Electrochem Commun.* – 2012. – № 19 – P. 13–16.
28. Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А. Анализ сорбционной способности по отношению к нефти и нефтепродуктам природных растительных материалов // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки.* – 2022. – № 10. – С. 115–120.
29. Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А., Майорова Е.И. Получение сорбента для сбора нефти и нефтепродуктов при их разливах путем утилизации отходов агропромышленного комплекса // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки.* – 2017. – № 11. – С. 84–89.
30. Bulauka Y.A., Mayorava K.I., Ayoub Z. Emergency sorbents for oil and petroleum product spills based on vegetable raw materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2018. – Vol. 451(1). – 012218. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012218
31. 藍舟琳. 玉米秸秆的生物改性及其对石油吸附性能的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013. Лань Чжоулинь. Биологическая модификация стеблей кукурузы и исследование их нефтеадсорбционных свойств. – Гуанчжоу: Южно-Китайский технологический ун-т, 2013.
32. 孙娟, 等. 农林废弃物制备纤维素气凝胶对石油的吸附性能 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 2025. Адсорбционные свойства целлюлозных аэрогелей, полученных из отходов агролесомелиорации, превращаются в нефть / Сунь Хуан и др. // *Журнал Китайского нефтяного университета (естественно-научное издание)*, 2025.
33. 孙晓军, 等. 生物炭材料在海洋石油类污染修复中的应用研究进展 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2023. Ход исследований по применению биоуглеродных материалов для ликвидации последствий нефтяного загрязнения на шельфе / Сунь Сяоцзюнь и др. // *Журнал океанологического университета Китая (естественнонаучное издание)*, 2023.

Поступила 29.03.2026

OIL POLLUTION CONTROL TECHNOLOGIES IN THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

LI QI

(Huanggang Polytechnic College, Hubei Province, China)

Y. BULAUKA

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article uses a systems approach to study the technologies for combating oil pollution of the environment in China, and provides a detailed examination of the methods for cleaning oil-contaminated soils, ways of cleaning contaminated water bodies, and the oil sorbents used. Semi-permeable membranes, reverse osmosis technologies, and sorption materials are widely used to clean groundwater and underground water from oil pollution. Oil-contaminated soil is cleaned using bioremediation technologies using microorganisms, technologies for physicochemical restoration of soils, and a combination of these methods. The performed analysis made it possible to identify possible ways to improve the technologies for combating oil pollution, which are aimed at reducing costs; reducing the cleaning cycle; the possibility of repeated use of reagents and minimal formation of non-recyclable waste; reducing the risk of secondary pollution; the possibility of combined restoration of contaminated soil and groundwater; optimization of the production of effective and multifunctional materials with a wide range of applications in various environmental conditions; determining the mechanisms of interaction between reagents and sorbents and pollutants; increasing the level of intellectualization and robotization of the equipment used in order to improve the safety of workers cleaning the surface of water and soil from contamination by oil and oil products.

Keywords: *oil pollution, water and soil purification, bioremediation, physicochemical recovery method, oil sorbent.*