ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья
Геотехнология и инженерная геология

Комбинированный метод восстановления загрязненных территорий нефтяного комплекса на основе электрохимической обработки с созданием геохимического барьера

Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова✉, Р.Р.Кадыров
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р. Комбинированный метод восстановления загрязненных территорий нефтяного комплекса на основе электрохимической обработки с созданием геохимического барьера // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 136-144. EDN RBJMNO

Аннотация
Масштабы экологической проблемы, связанной с загрязнением обширных площадей промышленных зон нефтяного комплекса, значительны и требуют использования новых технологических подходов при ее решении. Развивающейся технологией в данной области является применение электрохимической очистки, т.е. очистки загрязненной среды от нефтепродуктов и сопутствующих водных растворов загрязнителей при помощи пропускания электрических токов малой величины. Преимуществом данного метода является очистка и поверхностного плодородного, и глубинных почвенных слоев. К актуальным направлениям развития электрохимических методов очистки относится их интеграция с прочими технологиями ремедиации, что позволяет увеличивать эффективность очистки за счет окисления либо извлечения полютантов, а также существенно сокращать время проведения восстановительных технических мероприятий. Данная работа посвящена комбинированию обработки нефтезагрязненных грунтов постоянным электрическим током с внесением дополнительного окисляющего компонента – пероксида кальция. Предлагается создание в межэлектродной зоне реактивного геохимического барьера из пероксида кальция, который будет служить индуктором окислительных реакций, способствующих постепенной минерализации нефтяных углеводородов. В лабораторных условиях моделируется формирование направленного загрязненного электрофоретического потока, движущегося от анода к катоду через слой пероксида кальция, исследуются особенности протекания процесса очистки. Изучается динамика таких важных параметров среды, как напряжение, кислотность обрабатываемой среды, объем формируемого электрофоретического потока, содержание нефтепродуктов в твердой (почва) и жидкой (вода) фазах после очистки.

Ключевые слова
геохимический барьер; электрохимическая очистка; пероксид кальция; нефтезагрязненный грунт; дизельное топливо; подземные воды; эффективность очистки

Финансирование
Отсутствует.

Поступила: 30.06.2025 ***Принята: 28.04.2026*** ***Онлайн: 22.06.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Работа промышленных комплексов может приводить к загрязнению, т.е. существенному изменению в химическом составе почвенной среды и подземных вод. Особенно уязвимы в этом плане грунтовые воды и верхние напорные горизонты. Грунтовые воды составляют четверть всех запасов пресной воды, в то время как поверхностные воды занимают менее одного процента. Взаимосвязь между данными разновидностями водных ресурсов обусловливает достаточно активную миграцию полютантов между ними и почвенной средой. Загрязнение грунтовых вод способно быстро распространяться на большие территории, затрагивая поверхностные водоемы и системы питьевого водоснабжения, что делает эту проблему крайне актуальной.

По данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году», было обнаружено 4516 случаев загрязнения подземных вод, из них 2799 относятся к водозабору питьевого и хозяйственно-бытового назначения. Порядка 36 % от общего количества случаев связано с деятельностью промышленных предприятий.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Основными полютантами подземных вод являются азотные соединения (нитраты, нитриты, аммиак или аммоний), нефтепродукты, сульфаты и хлориды, а также тяжелые металлы и фенолы [1-6]. Повышенную опасность представляет загрязнение почв и грунтовых вод органическими соединениями, в частности нефтяными углеводородами. Количество случаев загрязнения подземных вод нефтепродуктами на начало 2025 г. составило 913. Пути их поступления весьма разнообразны и включают аварийные разливы при нефтедобыче и транспортировании, инфильтрацию при повреждении изоляции хранилищ, а также недостаточную очистку производственных сточных вод. На территориях нефтяного комплекса содержание органических компонентов в подземных водах превышает нормативные значения в десятки раз. Ситуация осложняется крайне тяжелыми и ресурсоемкими мониторингом подземной миграции загрязняющих веществ и их удалением.

Одним из развивающихся направлений решения проблемы является применение электрокинетических [7-9] и электроокислительных технологий [10, 11], позволяющих не только производить очистку почвы и воды в скважинах на значительной глубине, но и при необходимости корректировать направление движения подземных вод за счет создания электрофоретического потока между противоположно заряженными электродами [12-16].

Интерес представляет комбинирование данной технологии с прочими методами рекультивации [17-22]. В частности, возможно создание дополнительных активных геохимических барьеров для ускорения процесса электрохимической очистки и повышения его эффективности [23-25]. Геохимические барьеры – это участки геохимических систем, в которых происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их накопление или трансформация. Искусственно созданные активные барьеры, включающие наполнители или активные элементы из веществ, способных вступать в физико-химические реакции с полютантами, позволяют производить их удаление [26-28]. В общем случае барьер встраивается перпендикулярно траектории движения загрязненных подземных вод. Когда воды проходят через барьер, загрязняющие вещества задерживаются и вступают в химические реакции [29]. Эти реакции способствуют очищению проходящего потока. В идеальном случае барьеры должны обладать достаточной реактивностью, чтобы полностью задерживать токсиканты – быть проницаемыми для воды, но не для загрязняющих веществ, а также не требующими больших затрат энергии.

В данной работе представлены результаты исследований по очистке нефтезагрязненной среды за счет комбинирования электрообработки малыми токами и химической очистки в барьере из пероксида кальция (CaO_2). Внесение пероксида кальция способствует окислению нефтяных углеводородов [30, 31]. При использовании метода электрокинетического воздействия частицы нефтяных углеводородов, окруженные водной оболочкой, перемещаются в почве, а ионы, возникшие в результате диссоциации, мигрируют к аноду и катоду – все это создает контролируемый электрофоретический поток по всему объему почвы и способствует прохождению потока через проницаемый барьер из CaO_2.

Методология

Экспериментальные исследования были направлены на удаление дизельного топлива из водной почвенной фазы и почвы с помощью проницаемого реактивного барьера из пероксида кальция и направленного электрокинетического воздействия.

При проведении опытов создавались такие условия, чтобы основным очищающим элементом выступал пероксид кальция, а воздействие электрического тока формировало поток загрязненной жидкости, направленный к барьеру из CaO_2, и ускоряло ее перемещение.

Для экспериментов использовалась лабораторная установка, включавшая электрохимическую камеру открытого типа, стабилизирующий источник питания APS-1203, электроды, сосуды для электролита (воды) и загрязненного водного потока (рис.1, 2).

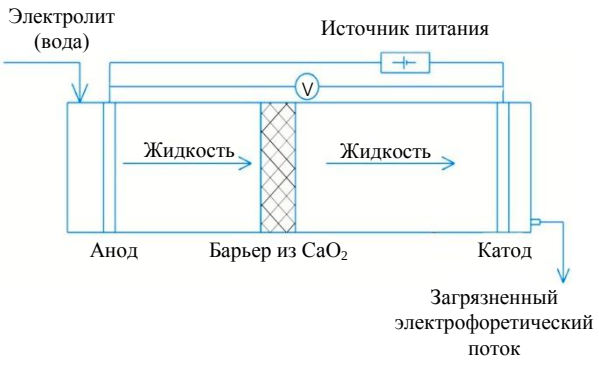


Рис.1. Схема исследовательской установки

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

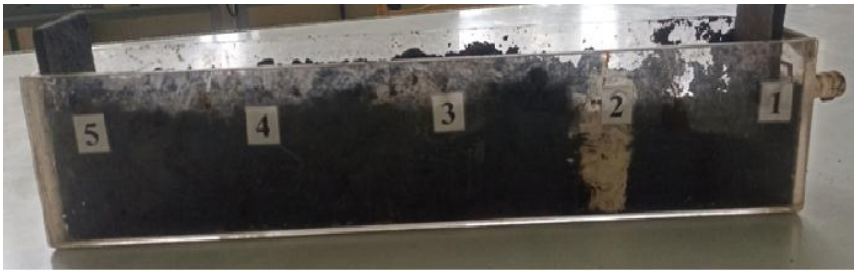


Рис.2. Вариант загрузки ячейки для проведения экспериментов. Реперные точки отбора проб почвы: 1 – катод; 2 – слой пероксида кальция; 3, 4 – точки в прианодном пространстве; 5 – анод

Экспериментальная электрохимическая камера имела форму параллелепипеда из оргстекла. Размеры камеры – длина 380 мм, ширина 58 мм, высота 90 мм. Использовались электроды в виде прямоугольных пластин из нержавеющей стали с сетчатой структурой, обеспечивающие однородность электрического поля по всему объему почвы. Материал электродов характеризовался достаточной устойчивостью к реакциям, протекающим на его поверхности.

Предварительно готовили модельную среду – почву на основе суглинка, искусственным путем загрязненную дизельным топливом. Исследования по электрохимической очистке, проводившиеся авторами ранее, позволили выявить общие закономерности снижения содержания нефтепродуктов в различных типах почв. Эффективность очистки уменьшается в ряду глина – суглинок – песок (усредненно 84,5 – 75 – 69 %) [9], таким образом, суглинку соответствует срединное значение. Это, а также широкая распространенность суглинков обусловили применение почвы этого типа в качестве основы для модельного грунта. Дизельное топливо было выбрано в качестве загрязняющего компонента для экспериментов ввиду его повсеместного использования для транспорта и технических средств, которое делает его одним из наиболее распространенных водно-почвенных полютантов. При этом уменьшение содержания нефти и дизельного топлива происходит по аналогичным закономерностям.

В почву массой 1 кг добавляли 10 г дизельного топлива, перемешивали и оставляли настояться на сутки. Основные характеристики топлива: плотность при 15 °С (ГОСТ Р 57037-2016) – 841,5 кг/м^3; массовая доля полициклических ароматических углеводородов (ГОСТ EN 12916-2017) – 2,2 %; массовая доля серы (ГОСТ ISO 20884-2016) – 7,6 мг/кг; температура вспышки в закрытом тигле (ГОСТ 6356-75) – 71 °С; коксуемость 10 %-ного остатка разгонки (ISO 10370-2014) – < 0,10 мас.%; зольность (ГОСТ 1461-2023) – отсутствует; массовая доля воды (ISO 12937-2000) – < 30 мг/кг; общее загрязнение (ГОСТ EN 12662-2016) – <12 мг/кг; коррозия медной пластинки при 50 °С (3 ч) (ГОСТ ISO 2160-2013) – класс 1; кинематическая вязкость при 40 °С (ГОСТ 33-2016) – 3,247 мм^2/с.

Роль активного геохимического барьера с окисляющими свойствами выполнял слой CaO_2. Пероксид кальция массой 50 г помещали в центральную область электрохимической камеры, в которой предварительно вручную уплотняли загрязненный дизельным топливом грунт. Область с пероксидом кальция первоначально отделялась от основной массы почвы с помощью бумажного фильтра, который позднее удалялся.

В емкость с почвой подавали воду (электролит) при помощи системы перфорированных трубок. Дополнительно использовались емкости для сбора переливающейся жидкости, выходящей из общей камеры. Одна металлическая пластина подключалась к положительному полюсу источника электрического тока (анод), а другая – к отрицательному (катод). В образцах почвы происходило однородное распределение электрического тока. На электроды подавалось напряжение 20 В. В ходе проведения обработки замерялись такие параметры процесса, как сила тока, кислотность среды, объем проходящего через почву электрофоретического потока, концентрация нефтепродуктов. Основным показателем, определяющим эффективность очистки, являлось содержание нефтепродуктов в выходящем жидкостном потоке и почве.

Для опытов использовалась водопроводная вода, так как применение дистиллированной воды не обеспечивает достаточную скорость процесса переноса жидкостного потока в силу отсутствия солей, способных к диссоциации. Основные физико-химические характеристики воды (электролита) до поступления в установку: водородный показатель – 7,40; общая минерализация (сухой остаток) –

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

348 мг/л; жесткость общая – 5,7 °Ж; окисляемость перманганатная – 0,037 мг/л; нефтепродукты – <0,05 мг/л; железо (Fe, суммарно) – 0,04 мг/л; нитраты (по NO_3^-) – 1,1 мг/л; сульфаты (SO_4^{2-}) – 105 мг/л; хлориды (Cl^-) – 11 мг/л; остаточный хлор свободный – 0,41 мг/л.

Время обработки составляло 10 ч (600 мин). Замеры силы электрического тока проводились каждые 30 мин.

Валовое содержание нефтепродуктов в почве определялось по РД 52.18.575-96 «Определение валового содержания нефтепродуктов в пробах почвы методом инфракрасной спектрометрии», в воде – по ПНД Ф 14.1:2:4.5-95 «Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в питьевых, поверхностных и сточных водах методом ИК-спектометрии». В ходе проведенных экспериментов использовался концентратомер КН-3.

Определение кислотности очищенного водного потока проводилось по методике измерения pH в водах потенциометрическим методом с применением прибора АНИОН-4100, определение кислотности почвы – при помощи измерителя почвенной температуры и влажности HI9921.

Для оценки объема очищенного жидкостного (электрофоретического) потока замерялись объемы электролита (воды), подававшегося в камеру, а также выходившего из нее после катода. Замеры проводились каждый час.

Результаты и обсуждение

В ходе проведения экспериментов проводились замеры величины силы тока каждые 30 мин при межэлектродном напряжении 20 В. Изменения силы тока во времени приведены на рис.3. Здесь и далее приводятся усредненные значения по трем повторностям экспериментов.

Как видно из графика на рис.3, на начальной стадии (до 180 мин) происходит увеличение силы электрического тока, что объясняется переходом солей из сорбированного состояния в растворенное (ионное). Кроме того, увеличивается температура обрабатываемой почвы, что приводит к уменьшению вязкости электрофоретического потока и увеличению скорости движения ионов. Затем концентрация ионов понижается, и ток выходит на стационарное значение, определяемое минерализацией воды (электролита).

Измерение объема электрофоретического потока, соответствовавшего объему очищенного жидкостного потока, прошедшего через барьер из пероксида кальция, проводилось каждый час. Результаты представлены в виде диаграммы на рис.4.

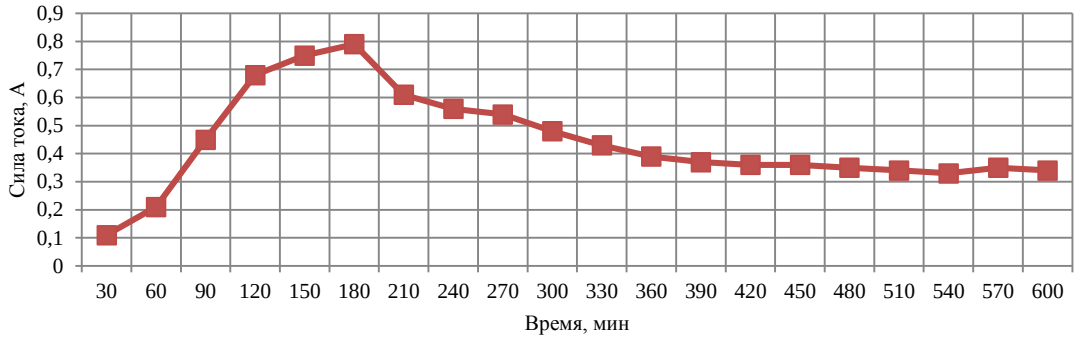


Рис.3. Динамика силы тока во времени

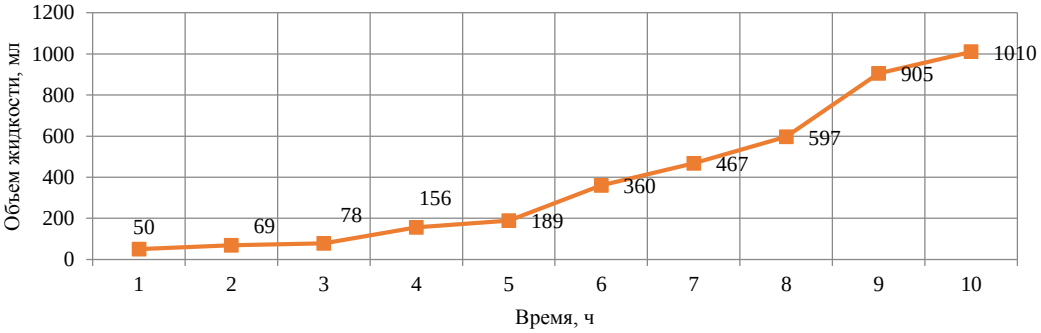


Рис.4. Изменение объема электрофоретического потока во времени

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Формирование электрофоретического потока обеспечивает перенос загрязняющих веществ по направлению к катоду, что в данном случае использовалось для создания направленного потока загрязненной воды к активному барьеру из пероксида кальция. Скорость электрофоретического потока возрастает от $G_1 \approx 19$ мл/ч $\approx 19 \cdot 10^{-3}$ л/ч$^{-1}$ до $G_2 \approx 200 \cdot 10^{-3}$ л/ч$^{-1}$ из-за повышения температуры обрабатываемой почвы от 20 до 61 °С, что приводит к уменьшению вязкости поровой жидкости и увеличению коэффициента фильтрации, определяющих объемный расход в межэлектродном пространстве.

Каждый час замерялась кислотность среды – почвы у катода и анода, жидкости после прохождения камеры. Результаты замеров pH у катода и анода представлены на рис.5. Величина кислотности жидкостного потока на выходе из камеры после катода и величина кислотности почвы в прикатодной зоне совпадали.

Как видно из графиков на рис.5, у катода формируется щелочная среда, у анода – кислая. При этом избыточная концентрация отрицательных ионов у катода совпадает с избыточной концентрацией положительных ионов у анода. Это объясняется тем, что скорость движения ионов к электродам можно оценить по формуле

$$V = -\frac{k}{\mu}\operatorname{grad}\left(P \pm |\rho_{\pm}|U\right),$$

где k – коэффициент проницаемости; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с; P – гидростатическое давление, Па; U – напряжение между электродами, В; $\rho_{\pm}$ – плотность заряда положительных и отрицательных ионов, Кл/м^3;

$$\rho_{+} = \sum z_i e n_i;$$

$$\rho_{-} = \sum z_j e n_j,$$

z_i – зарядовое число положительных ионов сорта i; n_i – концентрация положительных ионов сорта i, м$^{-3}$; z_j – зарядовое число отрицательных ионов сорта j; n_j – концентрация отрицательных ионов сорта j, м$^{-3}$; e – элементарный заряд, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Так как гидростатическое давление невелико по сравнению с электростатическим взаимодействием $P << \rho_{\pm}U$, из формулы скорости следует, что при равенстве плотностей зарядов положительных и отрицательных ионов скорости перемещения положительных ионов к катоду и отрицательных ионов к аноду практически совпадают.

Ключевым параметром, определяющим эффективность проведения очистки, является содержание нефтепродуктов в почве и жидкости после барьера из пероксида кальция. Анализ на количественное содержание нефтепродуктов проводился по истечении 10 ч. Почва отбиралась в прикатодной зоне. Каждая проба делилась на три части и анализировалась на концентратомере, после чего определялось среднее арифметическое значение содержания нефтепродуктов, которое использовалось уже для определения эффективности очистки.

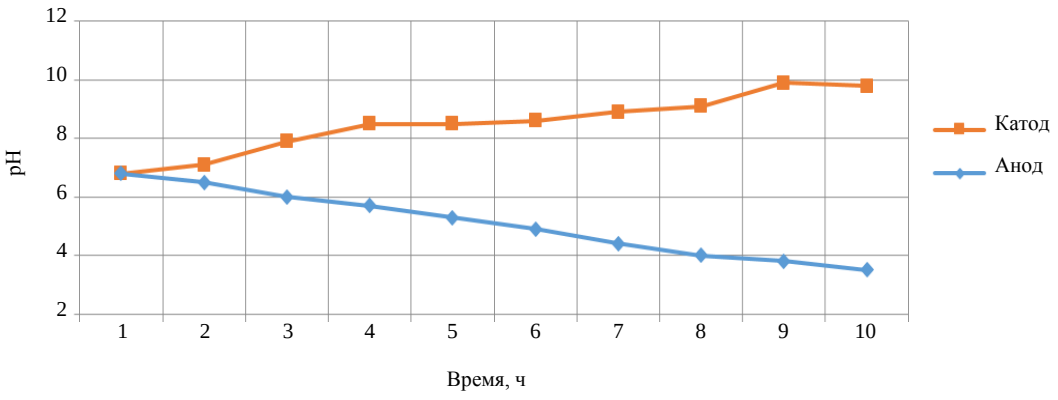


Рис.5. Изменение кислотности у электродов

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Начальная концентрация нефтепродуктов в почве $C_{нач}$ составляла 10020 мг/кг (усредненно по трем измерениям). Концентрация в катодной зоне после слоя пероксида кальция $C_{оч}$ через 10 ч эксперимента составила 1601 мг/кг. Исходя из этого, эффективность очистки почвы после пероксидного барьера

$$\varepsilon = \frac{C_{нач} - C_{оч}}{C_{нач}} \cdot 100\,\% = \frac{10020 - 1601}{10020} \cdot 100\,\% = 84{,}02\,\%.$$

Содержание нефтепродуктов в жидкости на выходе из камеры составило 1826 мг/л.

Создание электроосмотического потока при воздействии электрического тока приводит к перемещению загрязняющих компонентов, в том числе нефтепродуктов, в катодную зону с последующим их вымыванием с жидкой фазой. Это обуславливает повышенное содержание нефтепродуктов в воде по сравнению с почвенной средой (примерно на 2 %). При проведении аналогичного эксперимента, но без слоя пероксида кальция, содержание нефтепродуктов в прикатодной зоне почвы составило 3737 мг/кг. Эффективность очистки почвы без пероксидного барьера достигала 62,7 %. Содержание нефтепродуктов в электрофоретическом потоке без пероксидной очистки составляло 8461 мг/л. В таком случае можно сделать вывод, что барьер из пероксида кальция позволил увеличить эффективность очистки грунтовой воды до 78,42 %.

Снижение содержания нефтепродуктов в пероксидном слое осуществляется за счет окислительных процессов, в частности за счет образования пероксида водорода (H_2O_2) и гидроксильных радикалов. Гидроксильный радикал представляет собой мощный окислитель, играющий решающую роль в процессах химического окисления углеводородов, однако время его существования не превышает 10^{-9} с. При взаимодействии гидроксильных радикалов с моноароматическими кольцами образуются так называемые гидроксициклогексадиенильные радикалы. Впоследствии более 80 % этих радикалов превращается в фенол и подвергается дальнейшему окислению. В идеальных условиях возможно протекание полной минерализации органических соединений [32-34]. Пероксид водорода нестабилен и также достаточно активно участвует в окислении органики [35, 36]. Относительно малое время жизни пероксида водорода (от нескольких минут до нескольких часов) и гидроксильных радикалов может быть компенсировано использованием твердых пероксидов, например пероксида кальция, при осуществлении очистки подземных вод.

В результате взаимодействия пероксида кальция с водой протекают следующие химические реакции:

$$CaO_2 + 2H_2O \rightarrow H_2O_2 + Ca(OH)_2;$$

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2;$$

$$H_2O_2 + e^- \rightarrow OH^* + OH^-.$$

При создании оптимальных условий процесса постепенно происходит полная минерализация нефтяных углеводородов в грунтовой воде. Однако следует учитывать, что при отклонении от оптимальных условий проведения процесса возможно вторичное загрязнение очищаемой среды за счет образования высокотоксичных промежуточных продуктов окисления, в том числе хлорорганических соединений. В связи с этим крайне важным является осуществление контроля токсичности среды после очистки при помощи методов химического анализа либо посредством интегральной оценки методами биотестирования. Для предотвращения и минимизации образования токсичных соединений рекомендуется до реализации технологии электрохимической очистки в полевых условиях проводить предварительные тестовые лабораторные исследования на пробах, отобранных с конкретного участка загрязнения. Это позволит подобрать наиболее подходящие параметры обработки (напряжение, время и т.д.), а в крайнем случае – предусмотреть необходимость внедрение дополнительной промывки грунта.

Ключевым параметром системы является энергопотребление

$$W = \int_0^T UI(t)dt = \tilde{U}q,$$

где 0, T – пределы интегрирования по времени; I – сила тока, А; $\tilde{U}$ – усредненное значение напряжения, В; q – электрический заряд, пропущенный между анодом и катодом, Кл.

Рассчитанное на основании полученных данных энергопотребление составило 35,58 МДж на 1 кг нефтепродуктов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что комбинированное применение электрохимической обработки с созданием реактивного геохимического барьера из пероксида кальция является целесообразным как для рекультивации грунта, так и для очистки подземных вод.

Процесс очистки идет одновременно по нескольким направлениям. При электрокинетической очистке в результате пропускания электрического тока через нефтезагрязненный грунт происходит перемещение частиц нефтепродуктов, окруженных водной фазой, по направлению к катоду, что позволяет формировать направленный в сторону геохимического барьера электрофоретический поток. Активный элемент барьера – пероксид кальция способствует окислению нефтяных органических соединений за счет генерирования пероксида водорода при реакции с водной средой. Разложение части углеводородов происходит за счет электроиндуцируемых окислительных реакций, в том числе с участием гидроксильных радикалов, образуемых в грунте.

Использование дополнительного окисляющего слоя позволило повысить эффективность очистки на 21,32 %. В целом комбинирование двух рассматриваемых методов позволило достичь степени удаления дизельного топлива, составившей 84,02 %. Концентрация нефтепродуктов в выходном электрофоретическом потоке также существенно понизилась. Содержание нефтепродуктов в моделируемых подземных водах (загрязненном водном потоке на выходе из электрохимической камеры) без пероксидной очистки было равно 8461 мг/л. При формировании барьерного слоя из пероксида кальция данная величина уменьшилась на 6635 мг/л. Таким образом, эффективность очистки достигла 78,42 %, что позволяет сделать вывод о возможности применения рассматриваемого метода для очистки загрязненных подземных вод.

Следует учитывать, что изучение процессов электрохимической очистки с формированием геохимического барьера, рассмотренных в данной статье, осуществлялось с применением модельной загрязненной среды – суглинка, загрязненного дизельным топливом. В связи с этим практический интерес представляет расширение области исследований на другие типы почвы либо загрязнение иным видом нефтепродуктов, однако полученные результаты уже позволяют судить об общих закономерностях протекания процессов очистки в водно-почвенной среде. Глинистые грунты характеризуются мелкой дисперсностью и присутствием в составе железосодержащих минеральных соединений, что создает более благоприятные, по сравнению с песками, условия для протекания электроокислительных процессов, в частности фентоноподобных реакций. Однако высокая проницаемость песков способствует интенсификации электрокинетических процессов – перемещения полютантов в водной фазе.

Представленные исследования могут использоваться для определения параметров работы установки по очистке грунтовых вод в промышленных масштабах, а также для проектирования впоследствии моделей таких установок. В частности, расчеты, проведенные на основе полученных экспериментальных результатов, показали, что удельное энергопотребление установки по очистке грунта при комбинированной очистке относительно невелико и составит 35,58 МДж, или 9,8 кВт·ч на 1 кг нефтепродуктов. При ценовом тарифе электроэнергии 10 руб. за 1 кВт·ч стоимость удаления 1 кг нефтепродуктов будет составлять 98 руб. Нефтеемкость сухих грунтов колеблется от 10 до 300 г/кг. Грунт, содержащий более 150 г нефтепродуктов на 1 кг почвы, классифицируется как экстремально загрязненный. Если уровень загрязнения участка почвы составляет 30 % (300 г/кг), что соответствует аварийным разливам нефти, стоимость очистки 1 кг почвы будет равна 29,4 руб. Следует учитывать, что электроэнергия будет расходоваться не одномоментно, а в течение длительного периода времени (например, теплого сезона), что сделает возможным применение альтернативных источников энергии, таких как солнечные панели. В целом экономические затраты являются обоснованными при проведении электрохимической обработки почвы на значительной глубине, а также для подземных вод, когда иные технологии очистки труднопримени мы или фактически нереализуемы. При необходимости возможно снижение суммарной стоимости рекультивации за счет комбинирования электрохимической очистки с другими технологиями, например с применением сорбентов, фиторемедиации.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Комбинированный метод восстановления загрязненных территорий на основе электрохимической обработки с созданием геохимического барьера может применяться для очистки как глубоких почвенных горизонтов, так и подземных вод, загрязненных различными видами нефтепродуктов. Интерес представляет дальнейшее изучение специфики пространственного распределения полютантов в зонах между электродами и геохимическим барьером, а также подбор оптимальных объемов пероксида кальция, необходимых и достаточных для обеспечения эффективной очистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Talabi A.O., Kayode T.J.* Groundwater Pollution and Remediation // Journal of Water Resource and Protection. 2019. Vol. 11. № 1. P. 1-19. DOI: 10.4236/jwarp.2019.111001
2. *Sidiropoulos P.* Groundwater Pollution: Sources, Mechanisms, and Prevention // Hydrology. 2024. Vol. 11. Iss. 7. № 98. DOI: 10.3390/hydrology11070098
3. *Zohud A., Alam L., Goh C.T.* Evaluation of Groundwater Quality Using the Water Quality Index (WQI) and Human Health Risk (HHR) Assessment in West Bank, Palestine // Hydrology. 2023. Vol. 10. Iss. 10. № 198. DOI: 10.3390/hydrology10100198
4. *Ерзова В.А., Румынин В.Г., Никуленков А.М. и др.* Прогноз миграции радионуклидов в подземных водах в зоне влияния строительного дренажа Ленинградской АЭС-2 // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 194-211. DOI: 10.31897/PMI.2022.27
5. *Peiyue Li, Karunanidhi D., Subramani T., Srinivasamoorthy K.* Sources and Consequences of Groundwater Contamination // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2021. Vol. 80. Iss. 1. P. 1-10. DOI: 10.1007/s00244-020-00805-z
6. *Семячков А.И.,* Почечун В.А., Семячков К.А. Гидрогеоэкологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 168-179. DOI: 10.31897/PMI.2023.24
7. *Gingine V., Shah R.P., Venkata Koteswara Rao P., Hari Krishna P.* A review on study of Electrokinetic stabilization of Expansive soil // International Journal of Earth Science and Engineering. 2013. Vol. 6. № 2 (1). P. 176-181. DOI: 10.13140/2.1.2809.4086
8. *Vocciante M., Dovì V.G., Ferro S.* Sustainability in ElectroKinetic Remediation Processes: A Critical Analysis // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 2. № 770. DOI: 10.3390/su13020770
9. *Мешалкин В.П., Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р.* Энергоэффективный инжиниринг технологий в области электрохимической обработки нефтесодержащих грунтов // Теоретические основы химической технологии. 2024. Т. 58. № 2. С. 195-201. DOI: 10.31857/S0040357124020076
10. *Ganiyu S.O., Gamal El-Din M.* Insight into in-situ radical and non-radical oxidative degradation of organic compounds in complex real matrix during electrooxidation with boron doped diamond electrode: A case study of oil sands process water treatment // Applied Catalysis B: Environmental. 2020. Vol. 279. № 119366. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.119366
11. *Ferreira M.B., Sales Solano A.M., dos Santos E.V. et al.* Coupling of Anodic Oxidation and Soil Remediation Processes: A Review // Materials. 2020. Vol. 13. Iss. 19. № 4309. DOI: 10.3390/ma13194309
12. *Ganiyu S.O., Martínez-Huitle C.A., Rodrigo M.A.* Renewable energies driven electrochemical wastewater/soil decontamination technologies: A critical review of fundamental concepts and applications // Applied Catalysis B: Environmental. 2020. Vol. 270. № 118857. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.118857
13. *Streche C., Cocârță D.M., Istrate I.-A., Badea A.A.* Decontamination of Petroleum-Contaminated Soils Using The Electrochemical Technique: Remediation Degree and Energy Consumption // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. № 3272. DOI: 10.1038/s41598-018-21606-4
14. *Dehghan Abkenar S., Khakipour N., Alahdadi I.* Recent Advances in Electrochemical Treatment Technology for the Remediation of Contaminated Soil // Analytical and Bioanalytical Electrochemistry. 2024. Vol. 16. Iss. 3. P. 280-306. DOI: 10.22034/abec.2024.712243
15. *Шулаев Н.С., Мешалкин В.П., Пряничникова В.В. и др.* Электрохимическая очистка нефтезагрязненных грунтов с учетом рельефа местности // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 2. С. 9-13. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-2-9-13
16. *Shaoyang Han, Baotian Wang, Yu Wang et al.* Experimental study on soil improvement by electrochemical injection of calcium chloride solutions with time interval // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. № 15748. DOI: 10.1038/s41598-024-66508-w
17. *Wukui Zheng, Tian Cui, Hui Li.* Combined technologies for the remediation of soils contaminated by organic pollutants. A review // Environmental Chemistry Letters. 2022. Vol. 20. P. 2043-2062. DOI: 10.1007/s10311-022-01407-y
18. *Шулаев Н.С., Кадыров Р.Р., Пряничникова В.В.* Комбинированный метод фиторемедиации и электрообработки для очистки загрязненных территорий нефтяного комплекса // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 147-155.
19. *Wenwen Gu, Xixi Li, Qing Li et al.* Combined remediation of polychlorinated naphthalene-contaminated soil under multiple scenarios: An integrated method of genetic engineering and environmental remediation technology // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 405. № 124139. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124139
20. *Crognale S., Cocarta D.M., Streche C., D'Annibale A.* Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils // New Biotechnology. 2020. Vol. 58. P. 38-44. DOI: 10.1016/j.nbt.2020.04.002
21. *Chen Yao, Dong Liangfei, Zhang Feng'e.* Degradation of Organochlorine Pesticides by Ultrasonic-Thermally Co-activated Persulfate in Soil System // Journal of Changzhou University (Natural Science Edition). 2017. Vol. 29. № 1. P. 35-40.
22. *dos Santos E.V., Sáez C., Cañizares P. et al.* Treatment of *ex-situ* soil-washing fluids polluted with petroleum by anodic oxidation, photolysis, sonolysis and combined approaches // Chemical Engineering Journal. 2016. Vol. 310. Part 2. P. 581-588. DOI: 10.1016/j.cej.2016.05.015
23. *Andrade D.C., dos Santos E.V.* Combination of electrokinetic remediation with permeable reactive barriers to remove organic compounds from soils // Current Opinion in Electrochemistry. 2020. Vol. 22. P. 136-144. DOI: 10.1016/j.coelec.2020.06.002
24. *Fardin A.B., Jamshidi-Zanjani A.* A critical review on soil remediation using electrokinetic-enhanced permeable reactive barriers: Challenges and enhancements // Chemical Engineering Journal Advances. 2025. Vol. 23. № 100774. DOI: 10.1016/j.ceja.2025.100774
25. *Mengwei Li, Haidong Zhou, Yadan Wangjin et al.* Remediation of Cd-contaminated soil by electrokinetics coupled with the permeable reactive barrier from immobilized yeast // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 882. № 163451. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163451

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

26. *Jiang Xiao, Zhaohui Pang, Shukui Zhou et al.* The mechanism of acid-washed zero-valent iron/activated carbon as permeable reactive barrier enhanced electrokinetic remediation of uranium-contaminated soil // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 244. № 116667. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116667

27. *Budania R., Dangayach S.* A comprehensive review on permeable reactive barrier for the remediation of groundwater contamination // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 332. № 117343. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117343

28. *Sakr M., El Agamawi H., Klammler H. et al.* A review on the use of permeable reactive barriers as an effective technique for groundwater remediation // Groundwater for Sustainable Development. 2023. Vol. 21. № 100914. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100914

29. *Опекунов А.Ю., Коршунова Д.В., Опекунова М.Г. и др.* Анализ эффективности геохимических барьеров как основа применения природоподобных технологий очистки воды // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 343-355.

30. *Guoxuan Fan, Xitao Liu, Xiaowan Li et al.* Mechanochemical treatment with CaO-activated PDS of HCB contaminated soils // Chemosphere. 2020. Vol. 257. № 127207. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127207

31. *Więckol-Ryk A., Thomas M., Białecka B.* Solid Peroxy Compounds as Additives to Organic Waste for Reclamation of Post-Industrial Contaminated Soils // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 22. № 6979. DOI: 10.3390/ma14226979

32. *Wei Zhou, Ljiljana Rajic, Long Chen et al.* Activated carbon as effective cathode material in iron-free Electro-Fenton process: Integrated H_2O_2 electrogeneration, activation, and pollutants adsorption // Electrochimica Acta. 2019. Vol. 296. P. 317-326. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.11.052

33. *Zanko L.M., Wittle J.K., Pamukcu S.* Case study: Electrochemical Geo-Oxidation (ECGO) treatment of Massachusetts New Bedford Harbor sediment PCBs // Electrochimica Acta. 2020. Vol. 354. № 136690. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136690

34. *Adhami S., Jamshidi-Zanjani A., Darban A.K.* Remediation of oil-based drilling waste using the electrokinetic-Fenton method // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 149. P. 432-441. DOI: 10.1016/j.psep.2020.11.018

35. *Targhan H., Evans P., Bahrami K.* A review of the role of hydrogen peroxide in organic transformations // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2021. Vol. 104. P. 295-332. DOI: 10.1016/j.jiec.2021.08.024

36. *Пай З.П., Пармон В.Н., Бухтияров В.И.* Катализаторы жидкофазного окисления пероксидом водорода органических соединений: гомогенные и межфазные системы // Кинетика и катализ. 2023. Т. 64. № 4. С. 347-383. DOI: 10.31857/S0453881123040123

***Авторы*: Николай Сергеевич Шулаев,** *д-р техн. наук, профессор* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-3595-6948*, **Валерия Валерьевна Пряничникова,** *канд. техн. наук, доцент* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия*), *prvaleria@mail.ru*, *https://orcid.org/0000-0001-8997-5186*, **Рамиль Римович Кадыров,** *канд. техн. наук, доцент* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-6665-9375*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0