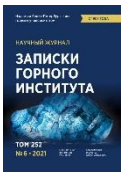
ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

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



Научная статья
УДК 504.062

Закономерности электрохимической очистки нефтезагрязненных грунтов

Н.С.ШУЛАЕВ, В.В.ПРЯНИЧНИКОВА, Р.Р.КАДЫРОВ ✉
Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Стерлитамак, Стерлитамак, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Шулаев Н.С. Закономерности электрохимической очистки нефтезагрязненных грунтов / Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова, Р.Р.Кадыров // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 937-946. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.15

Аннотация. Электрохимическая очистка нефтезагрязненных грунтов является перспективным направлением обеспечения экологической безопасности окружающей среды, так как может быть достаточно просто организована даже на участках, отдаленных от населенных пунктов. Для этого в качестве оборудования необходимы источник электроэнергии и система электродов. Возможно использование электрогенератора, если поблизости нет электроснабжающих линий. Материал электродов влияет на особенности окислительно-восстановительных процессов, что может сказываться на энергозатратах и степени очистки грунта от нефти или нефтепродуктов. Поэтому правильный выбор материалов электродов является одной из важных задач в области инжиниринга электрохимических методов очистки. Были исследованы изменения основных параметров (влажности, температуры, степени кислотности) в загрязненном нефтью модельном грунте, близком по составу к одному из нефтяных месторождений. Измерения параметров при использовании графитовых и металлических электродов осуществлялись на нескольких фиксированных участках межэлектродного пространства в зависимости от времени обработки. Установленные закономерности изменения параметров при очистке нефтезагрязненных грунтов позволяют сделать выводы об этапах электрохимического процесса, его скорости и энергоэффективности. Полученные результаты создают базу для проектирования промышленных установок по очистке грунтов.

***Ключевые слова*:** электрохимический метод; нефтезагрязненный грунт; электрод; электрический ток; параметры

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-24041.

Принята: 30.11.2021 ***Онлайн: 02.02.2022*** ***Опубликована: 27.12.2021***

Введение. Электрохимический метод воздействия является перспективным для решения экологических проблем, в частности для очистки грунтов от нефтепродуктов [9, 13, 14], хлорорганических соединений [5, 26] и других загрязнителей [3, 4, 7]. К особенностям этого метода относятся: высокая эффективность очистки, возможность сочетания с другими способами ремедиации [20, 19, 33], мобильность за счет использования компактного оборудования и простота развертывания практически на любой местности, даже значительно удаленной от населенных пунктов [16, 29, 34]. В ходе обработки грунтов электрическим током также происходит их укрепление [12]. Благодаря этим особенностям область применения электрохимической очистки расширяется [11, 27, 30].

Основным оборудованием для электрохимической очистки являются источник электроэнергии и система электродов (анодов и катодов), погруженных в грунт на глубину загрязнения [8, 22]. При наличии рядом с участком загрязнения линий электропередач можно подключить к ней источник электроэнергии и системы электродов, если такая линия отсутствует, то необходим генератор электроэнергии. Мощность источника выбирается, исходя из энергозатрат на очистку и времени работы [15, 17]. Возможно использование генераторов, работающих на ископаемом топливе, а также на возобновляемых источниках энергии – солнечной или ветровой [25].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 937-946
DOI: 10.31897/PMI.2021.6.15
© Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова, Р.Р.Кадыров, 2021

Электроды устанавливаются в грунт в соответствии с наиболее эффективной схемой размещения, обеспечивающей высокую степень очистки при минимально возможных энергозатратах. При пропускании постоянного электрического тока через нефтезагрязненный грунт происходят окислительно-восстановительные процессы, характерные для электролиза растворов [23, 24, 28]. Состав электролитической жидкости и материал анода определяют тип реакций окисления и восстановления [21, 35]. Если применяются инертные аноды (нерастворимый электрод), то будет происходить электронный обмен без разрушения электрода [2]. Если же применяется активный анод (растворимый электрод), то он сам способен окисляться при электролизе. Таким образом, материал электродов существенно влияет на эффективность и энергозатраты очистки и определяет срок эксплуатации. Исходя из этого, актуальной является оценка эффективности электрохимических процессов в зависимости от материалов электродов, подбор которых позволит повысить эффективность очистки загрязненных грунтов при заданном интервале времени обработки с минимально возможными энергетическими затратами.

Цель работы – установить закономерности изменения основных параметров (влажности, температуры, степени кислотности) нефтезагрязненных грунтов в межэлектродном пространстве в зависимости от времени обработки при использовании графитовых и металлических электродов, что необходимо при проектировании промышленных установок.

В [6, 31, 32] установлено, что при пропускании электрического тока концентрация нефтепродуктов уменьшается по экспоненциальному закону:

$$C(t) = C_0 e^{-\alpha I t} = C_0 e^{-\alpha q(t)},$$

где C_0 – начальная концентрация нефтепродуктов, кг/м^3; I – электрический ток, А; $q(t)$ – заряд, прошедший через грунт, Кл; α – коэффициент, зависящий от вида нефтезагрязненного грунта и массы нефтепродуктов на очищаемом участке, Кл$^{-1}$,

$$\alpha = \frac{1}{C_0 V q_{\text{уд}}},$$

V – объем загрязненного грунта, м^3; $q_{\text{уд}}$ – удельный заряд, необходимый для удаления 1 кг нефтепродуктов (для глинистого грунта – $6{,}3 \cdot 10^6$, чернозема – $9{,}6 \cdot 10^6$, суглинка – $9{,}3 \cdot 10^6$, песчаного грунта – $13{,}4 \cdot 10^6$ Кл/кг [1, 10]).

Методология. Эксперименты проводились с модельным грунтом, содержащим растворы солей (NaCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$ и др.) и нефть [18]. Загрязнение нефтью составляло – % по массе на 1 кг грунта.

Модельный грунт массой 1,5 кг помещался в ячейку из оргстекла в виде прямоугольного параллелепипеда (рис.1). В грунт погружались электроды.

Наиболее важно измерять влажность, степень кислотности, температуру в трех точках: у катода, анода и посередине между электродами. В экспериментах измерения этих параметров периодически проводились при заданном токе в пяти точках межэлектродного пространства, чтобы получить более подробную характеристику распределения параметров по расстоянию, в том числе для дальнейшего моделирования.

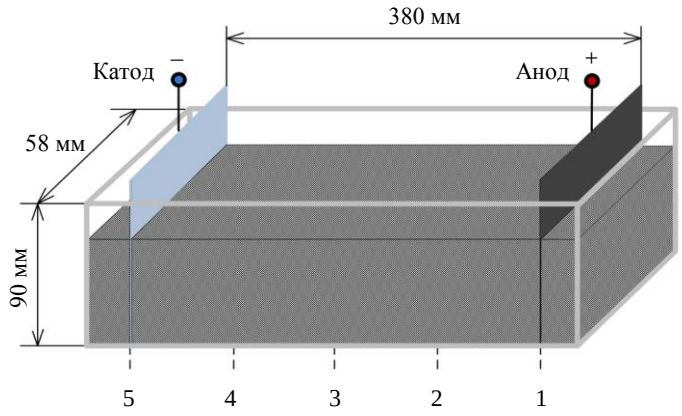


Рис.1. Ячейка с модельным грунтом и электродами

В экспериментах электрический ток между электродами поддерживался постоянной величины (0,8 А), что позволяло в интервале 360 мин определять основные закономерности изменения измеряемых параметров (их контроль и регистрация осуществлялись каждые 30 мин).

Одной из задач исследований являлось изучение влияния материала электродов на характер электрохимического

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2021.6.15

Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 937-946
© Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова, Р.Р.Кадыров, 2021

процесса очистки. В первом случае в качестве электродов использовалась графитовая пара, во втором – стальной катод (СК) и окисно-рутениевый анод на титановой основе (ОРТА).

Результаты и их обсуждение. Измерение напряжения, подаваемого на графитовые электроды, при постоянной величине электрического тока 0,8 А позволило зафиксировать его падение за первые 90 мин с 61,9 до 38,5 В и постепенное увеличение до 52 В к 360 мин (рис.2).

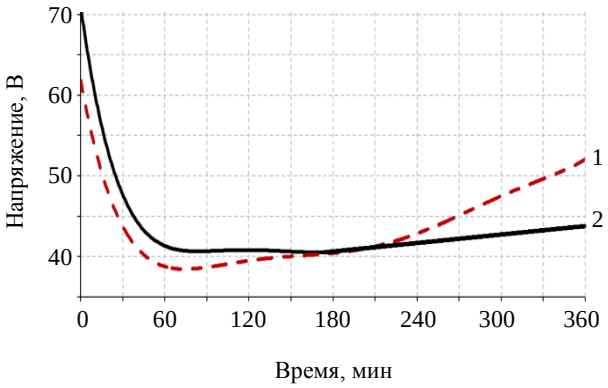


Рис.2. Изменение напряжения во времени
1 – с графитовыми электродами; 2 – СК и ОРТА

При измерении напряжения между металлическими электродами СК и ОРТА также поддерживался постоянный ток 0,8 А. При этом напряжение за первые 90 мин снижалось с 71 до 40,4 В, затем медленно возрастало до 47 к 360 мин (рис.2).

Понижение напряжения в первые 90 мин в опытах с графитовыми и металлическими электродами (СК-ОРТА) объясняется тем, что в этот период происходит рост проводимости, связанный с перераспределением концентрации влажности грунта в результате электрокинетических процессов. В интервале времени $90 < t < 360$ мин при использовании графитовых электродов напряжение растет быстрее и достигает большего значения, чем при использовании металлических электродов, следовательно, во втором случае интегральная проводимость выше, а энергозатраты меньше. Для дальнейшего поддержания постоянного значения тока при использовании графитовых электродов, в отличие от металлических, потребуется большее напряжение внешнего источника питания из-за повышенного перенапряжения выделения водорода и кислорода. При более высоком перенапряжении замедляется электрохимический процесс, снижается проводимость и повышается непроизводительный расход электроэнергии на поляризацию электродов.

Из анализа перераспределения влажности в ячейках с графитовыми и металлическими (СК-ОРТА) электродами можно отметить, что влажность на катоде и аноде увеличивается до 90 мин, после чего снижается. В приэлектродных зонах значения влажности значительно выше, чем в центральной межэлектродной зоне (рис.3). Оценивая профили влажности отдельно для разных материалов электродов, можно заметить, что максимальные значения влажности с графитовыми электродами – в областях катода и анода, а в средней части ячейки влажность стремится к минимуму (рис.3, *а*); в случае с электродами СК-ОРТА минимум влажности смещен от центра к катоду (рис.3, *б*), следовательно, в этой области испарение жидкости интенсивнее, что приводит к увеличению электрического сопротивления.

При исследовании температурных полей в ячейке с графитовыми электродами видно, что максимальные значения достигаются в центральной области между электродами (третья точка), минимальные – в анодной и катодной областях (рис.4, *а*). Температура в ячейке с металлическими электродами (СК-ОРТА) имеет максимальные значения в четвертой точке, а минимальные – в анодной области (рис.4, *б*). Эти показания подтверждаются данными тепловизионной съемки (рис.5), выполненной прибором RGK TL-80. Повышение температуры в центральной межэлектродной области объясняется уменьшением проводимости в рассматриваемой зоне.

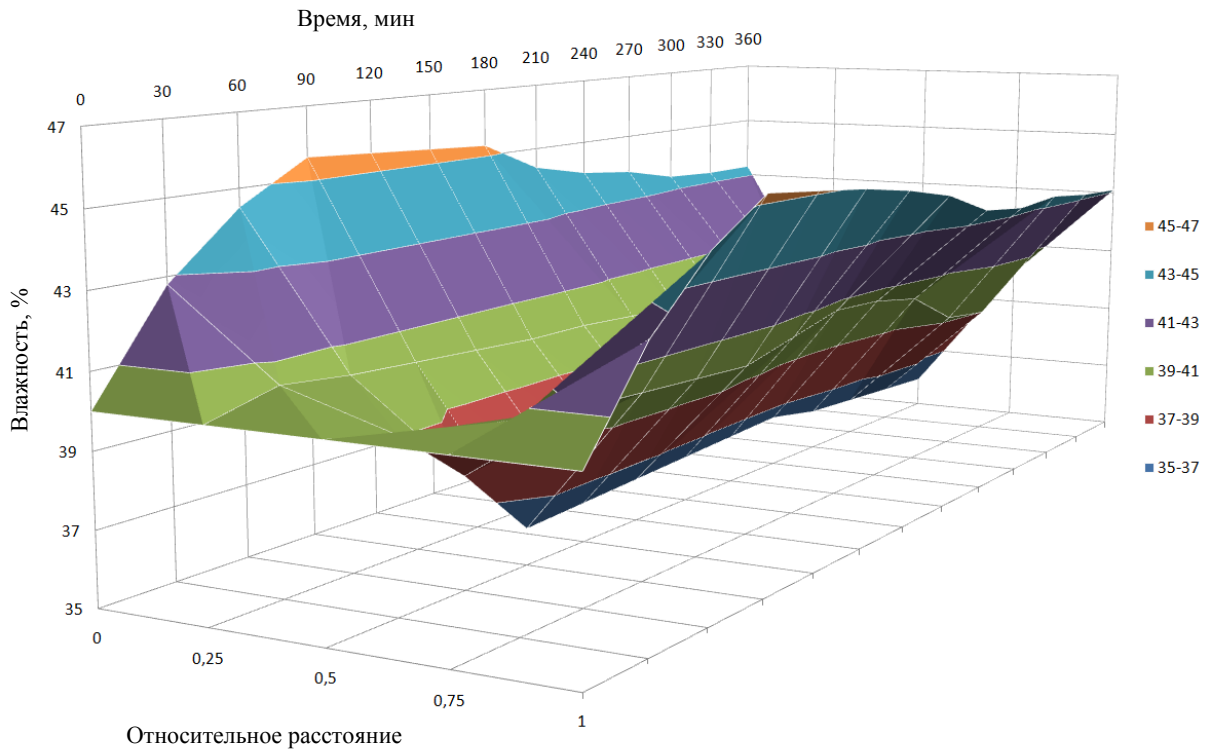
Полученные данные температурного профиля указывают, что в случае использования графитовых электродов удельное сопротивление грунта в центральной области выше, чем в приэлектродных областях, а при использовании электродов СК-ОРТА наибольшее удельное сопротивление грунта смещается во времени от центральной части в прикатодную область.

Показания степени кислотности грунта изменяются от слабокислой до сильнокислой во всех точках, затем к завершению измерений в области катода образуется щелочная среда (рис.6). В случае использования электродов СК-ОРТА щелочная среда формируется за меньший интервал времени.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 937-946
DOI: 10.31897/PMI.2021.6.15
© Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова, Р.Р.Кадыров, 2021

а



б

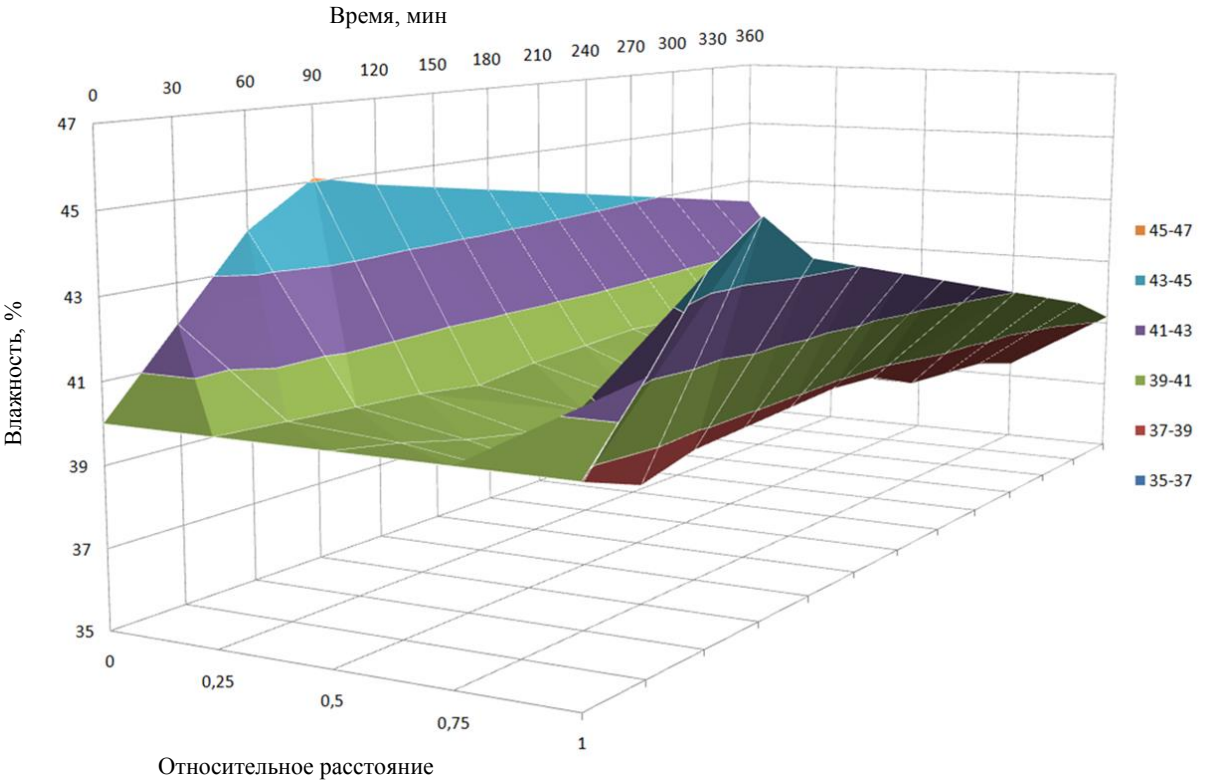


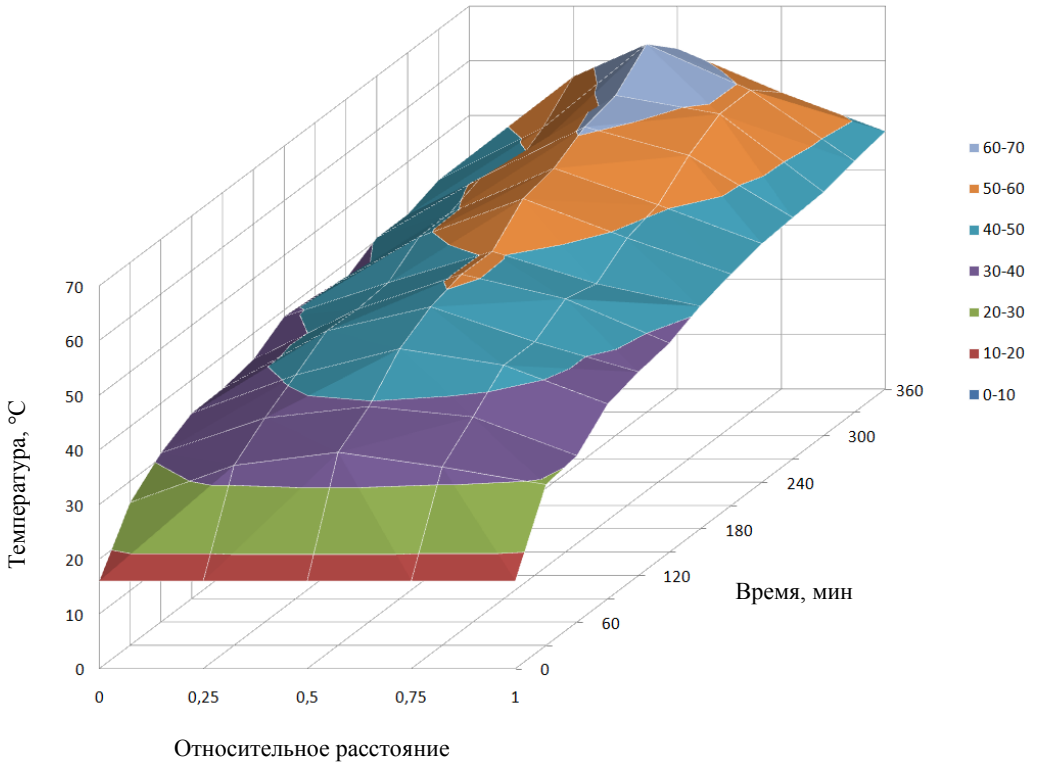
Рис.3. Изменение влажности во времени на разных расстояниях от электродов: *а* – с графитовыми электродами; *б* – СК и ОРТА

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2021.6.15

© Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова, Р.Р.Кадыров, 2021

а



б

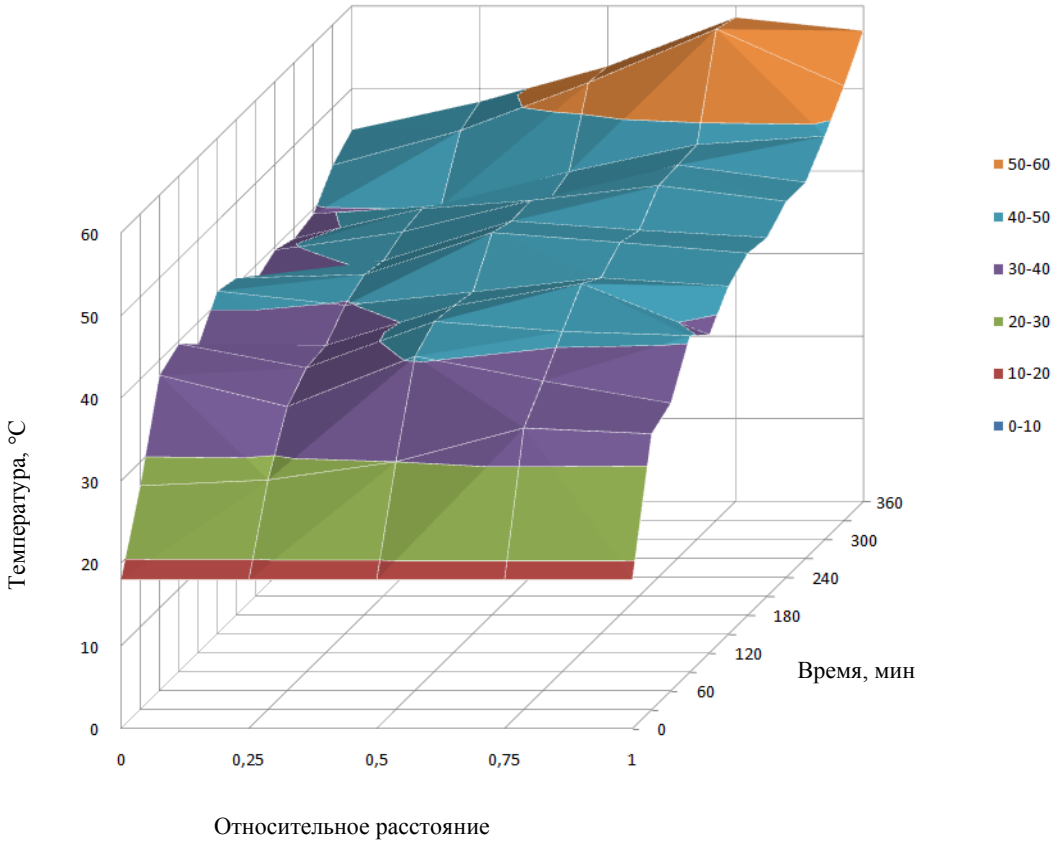


Рис.4. Изменение температуры во времени на разных расстояниях от электродов: *а* – с графитовыми электродами; *б* – СК и ОРТА

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 937-946
DOI: 10.31897/PMI.2021.6.15
© Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова, Р.Р.Кадыров, 2021

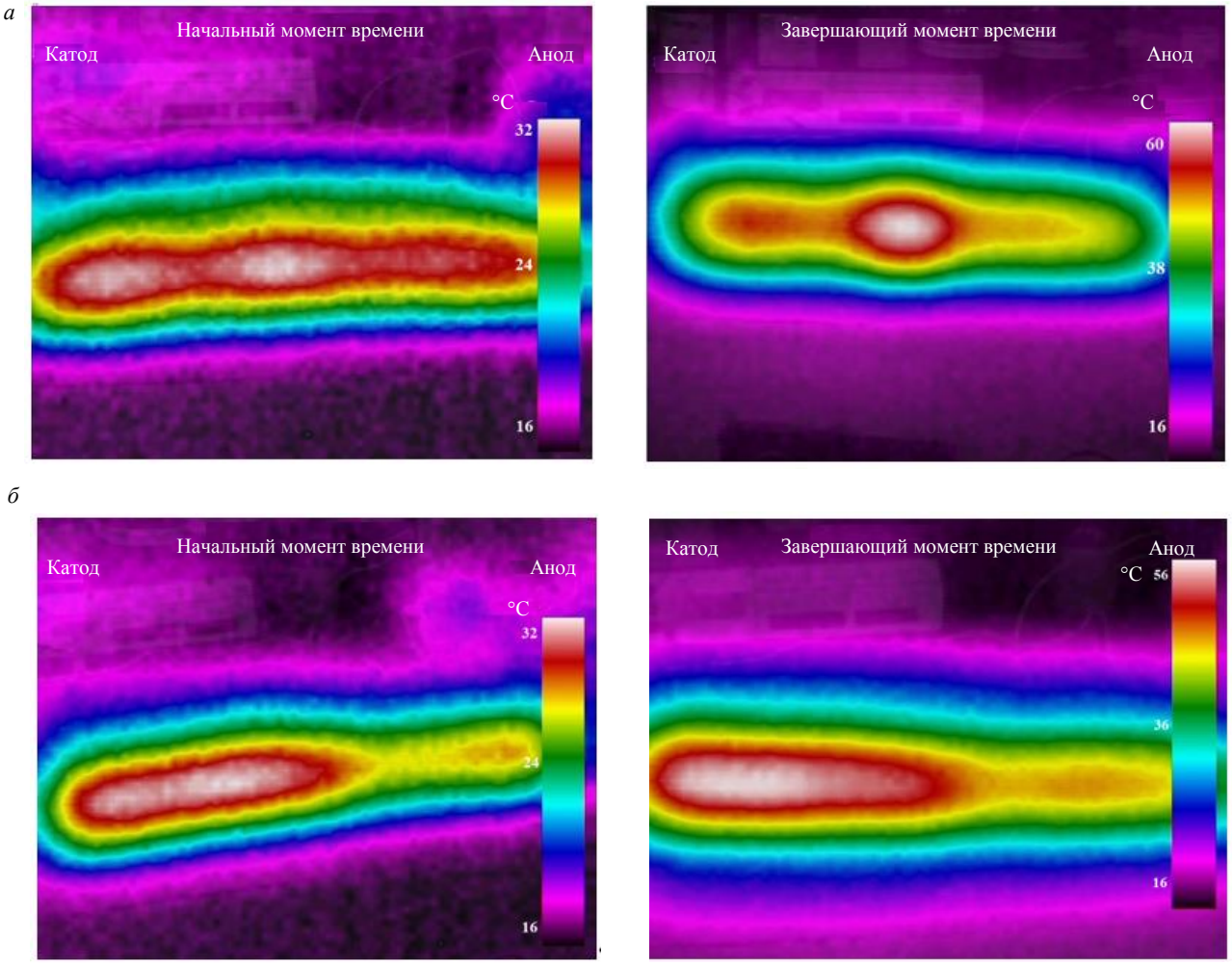


Рис.5. Распределение температуры при тепловизионной съемке в начальный и завершающий моменты времени: *а* – с графитовыми электродами; *б* – СК и ОРТА

Для анализа электрохимических процессов выбран профиль температур между электродами (рис.7). Исходя из приведенных графиков, распределение температуры имеет параболический характер. Если ячейка с графитовыми электродами, то температура на 180 и 360 мин достигает максимума в центральной части ячейки, а в районе электродов она минимальна. В случае с электродами СК-ОРТА вершина параболы на 180 и 360 мин смещена к катоду, достигая в прикатодной области максимальной величины.

Приведенные результаты исследований можно объяснить тем, что модельный грунт насыщен растворами солей, преимущественно хлоридами, из-за чего создаются условия для электролиза. После подачи напряжения на электроды возникает интенсивное движение ионов. Поскольку в качестве анодов для опытов применялись графитовая и окисно-рутениевая пластины, то окисление проходило аналогично электролизу растворов с инертным анодом. В результате чего на аноде окисляются ионы Cl^- с выделением Cl_2 и вода с выделением O_2 и образованием H^+. Также в районе анода постепенно увеличивается концентрация HCl, что в дальнейшем приводит к понижению pH грунта на большей части ячейки. Широкая полоса сильнокислой среды создает благоприятные условия для очистки грунта от нефтяного загрязнителя (степень очистки нефтезагрязненного грунта – более 71 %). Однако при этом происходит закисливание грунта, поэтому периодически можно измененять полярность электродов для приближения к нейтральному уровню pH.

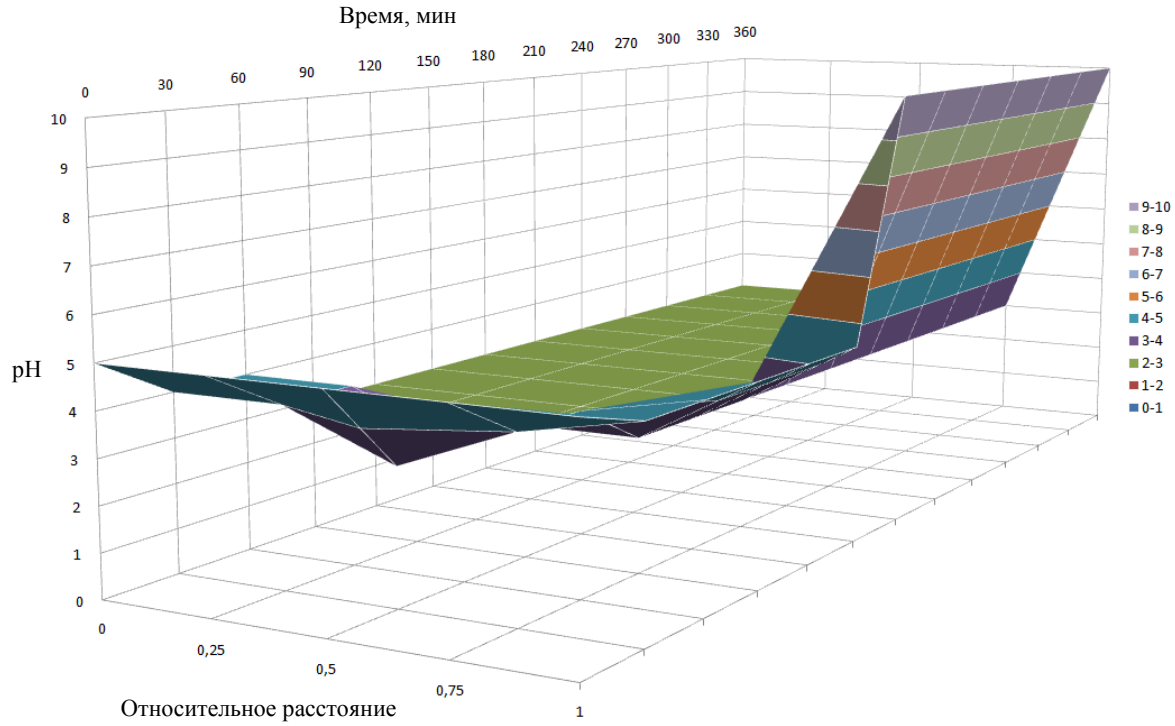
Поскольку в растворе относительно большое количество катионов активных металлов Ca, Na, Mg, то на катоде они не восстанавливаются, а концентрируются около него в виде щелочных растворов. На катоде из воды восстанавливаются только ионы водорода с выделением газа.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2021.6.15

© Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова, Р.Р.Кадыров, 2021

а



б

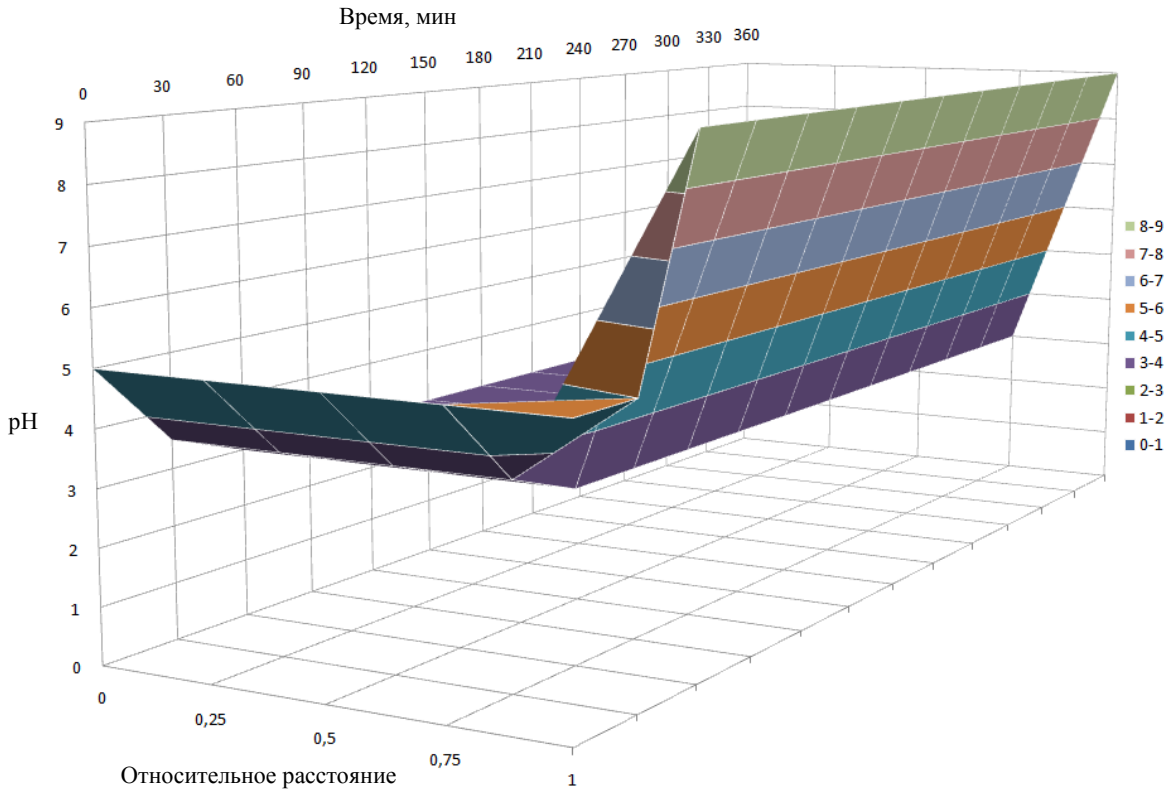


Рис.6. Изменение pH во времени на разных расстояниях от электродов: *а* – с графитовыми электродами; *б* – СК и ОРТА

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2021.6.15

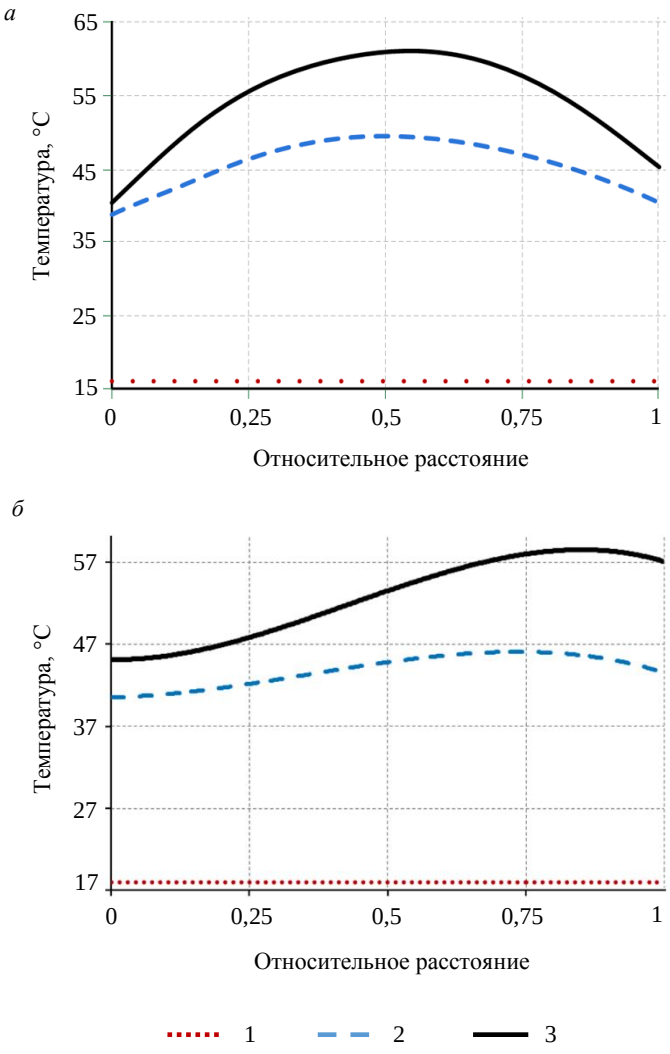


Рис.7. Изменение температуры на относительном расстоянии от электродов (от анода (0,0) к катоду (1,0) в разные моменты времени: *а* – с графитовыми электродами; *б* – СК и ОРТА

1 – при t = 0; 2 – 180; 3 – 360 мин

Аналогичные результаты были представлены в [3, 15, 29], но для других грунтов и степени загрязнения.

Наличие на графиках участков с минимальным значением влажности характеризует высушивание, которое в ряде случаев применяется для укрепления грунтов. В таких участках низкая проводимость, которая способствует Джоулеву нагреву, о чем свидетельствуют графики распределения температур. В анодных областях наблюдаются более низкие температуры, чем в катодных. При использовании графитовых электродов максимальная температура достигается в середине ячейки, а при использовании СК-ОРТА – в прикатодной области. Это связано с особенностями материалов электродов: СК и ОРТА имеют более низкие значения перенапряжения, чем графитовые, что увеличивает проводимость в целом; перенапряжение ОРТА меньше, чем у СК, поэтому проводимость у анода выше по сравнению с прикатодной областью, о чем свидетельствуют графики температурных полей и влажности грунта.

Заключение. Из анализа экспериментальных исследований с графитовыми и металлическими электродами (СК-ОРТА) было установлено:

• напряжение на начальном этапе падает до минимума, затем медленно возрастает, однако при использовании металлических электродов (СК-ОРТА) напряжение растет с меньшей скоростью, что свидетельствует о меньших энергозатратах и увеличении удельного сопротивления грунта;

• влажность на катоде и аноде возрастает до определенного момента времени, после чего снижается; на электродах влажность в течение всего интервала времени была выше, чем в межэлектродной зоне (при использовании графитовых электродов влажность стремится к минимуму в средней части ячейки, а при использовании СК и ОРТА минимум влажности смещен от центра к катоду);

• температура в ячейке с графитовыми электродами имеет наибольшие значения в середине между электродами, наименьшие – на аноде и катоде; температура на завершающем этапе в ячейке с металлическими электродами (СК-ОРТА) имеет наибольшие значения в катодной области, наименьшие – в области анода;

• pH грунта изменяется от слабокислой до сильнокислой во всех точках, но с определенного момента времени у катода образуется щелочная среда (при использовании СК-ОРТА электродов она образуется раньше), на остальных участках ячейки с исследуемым грунтом среда остается сильнокислой, причем степень кислотности с приближением к аноду возрастает.

Приведенные результаты экспериментальных исследований параметров нефтезагрязненного грунта (температуры, влажности, степени кислотности) во времени и на различных расстояниях от катода и анода позволяют сделать выводы об основных этапах электрохимического процесса и

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

его скорости. Использование металлических (СК-ОРТА) электродов показывает, что они более энергоэффективны, чем графитовые, а также имеют наибольший ресурс эксплуатации.

Выявленные закономерности электрохимических процессов необходимо учитывать при проектировании промышленных установок по очистке грунтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воздействие электрического тока на почвы, загрязненные нефтепродуктами / Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова, Р.Р.Кадыров и др. // Бутлеровские сообщения. 2020. Т. 61. № 2. С. 132-138. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-61-2-132

2. *Желовицкая А.В.* Электродные материалы, применяемые для генерирования активных радикалов при обработке сточных вод / А.В.Желовицкая, А.Ф.Дресвянников // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 4. С. 107-112.

3. *Королев В.А.* Итоги международной конференции EREM-2017 – Электрокинетическая очистка грунтов от загрязнений / В.А.Королев, Д.С.Нестеров // Инженерные изыскания. 2017. № 10. С. 14-22. DOI: 10.25296/1997-8650-2017-10-14-22

4. *Королев В.А.* Электрохимическая очистка грунтов от экотоксикантов: итоги и перспективы // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2008. № 1. С. 13-20.

5. *Лысенко Л.Л.* Усовершенствование метода электрокинетической очистки тонкодисперсных глинистых почв // Экологическая химия. 2014. Т. 23. № 1. С. 13-21.

6. *Мешалкин В.П.* Экспериментально-теоретический инжиниринг энергоэффективного электрохимического процесса очистки почвы от нефтяных загрязнений / В.П.Мешалкин, Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова // Доклады Российской академии наук. 2020. Т. 491. С. 15-19. DOI: 10.31857/S2686953520020053

7. *Простов С.М.* Физические предпосылки очистки грунтовых массивов от загрязнений электрохимическим методом // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 2. С. 136-139

8. *Шабанов Е.А.* Лабораторные исследования процессов электрохимической очистки грунтов в основаниях эксплуатируемых зданий и сооружений от нефтепродуктов / Е.А.Шабанов, С.М.Простов, О.В.Герасимов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 4. С. 168-180. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-168-180

9. *Шабанов Е.А.* Натурные испытания метода контролируемой электрохимической очистки грунта от нефтезагрязнений. Ч. III. Электрофизический мониторинг зоны загрязнения / Е.А.Шабанов, С.М.Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 3. С. 80-86.

10. Электрохимическая очистка грунтов с различной концентрацией нефтяных загрязнений при использовании единого источника электрического напряжения / Н.С.Шулаев, В.В.Пряничникова, Р.Р.Кадыров, И.В.Овсянникова и др. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 6. С. 674-680. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-6-674-680

11. Analysis of Electro-Oxidation Suitability for Landfill Leachate Treatment through an Experimental Study / E.Rada, I.Istrate, M.Ragazzi et al. // Sustainability. 2016. Vol. 5. Iss. 9. P. 149-172. DOI: 10.1201/b20005-13

12. A review on study of Electrokinetic stabilization of Expansive soil / V.Gingine, R.P.Shah, R.Koteswar, P.Hari Krishna // International Journal on Earth Science and Engineering. 2013. Vol. 2. P. 176-181. DOI: 10.13140/2.1.2809.4086

13. *Asadollahfardi G.* Electrokinetic remediation of diesel-contaminated silty sand under continuous and periodic voltage application / G.Asadollahfardi, M.Rezaee // Environmental Engineering Research. 2018. Vol. 24. Iss. 3. P. 456-462. DOI: 10.4491/eer.2018.301

14. *Cameselle C.* Development and enhancement of electro-osmotic flow for the removal of contaminants from soils / C.Cameselle, K.R.Reddy // Electrochimica Act. 2012. Vol. 86. P. 10-22. DOI: 10.1016/j.electacta.2012.06.121

15. *Cocarta D.M.* Removal of Total Petroleum Hydrocarbons from Contaminated Soils by Electrochemical Method / D.M.Cocarta, I.A.Istrate, C.Streche, D.M.Dumitru // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering. 2017. Vol. 11. № 5. P. 469-473. DOI: 10.5281/zenodo.1131870

16. Coupling of Anodic Oxidation and Soil Remediation Processes: A Review / M.B.Ferreira, A.M.Sales Solano, E.V.Santos et al. // Materials. 2020. Vol. 13. Iss. 19. № 4309. DOI: 10.3390/ma13194309

17. Decontamination of Petroleum-Contaminated Soils Using The Electrochemical Technique: Remediation Degree and Energy Consumption / C.Streche, D.Cocarta, I.Istrate, A.Badea // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. № 3272. DOI: 10.1038/s41598-018-21606-4

18. Determination of electrical parameters for the electrochemical treatment of soils contaminated with oil / V.P.Meshalkin, N.S.Shulaev, V.V.Chelnokov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. Iss. 6. P. 62-69. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062069

19. Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils / S.Crognale, D.Cocarta, C.Streche, A.D'Annibale // New Biotechnology. 2020. Vol. 58. P. 38-44. DOI: 10.1016/j.nbt.2020.04.002

20. Electrokinetic Treatment of Polluted Soil with Petroleum Coupled to an Advanced Oxidation Process for Remediation of Its Effluent / E.Bernardo Sabino da Silva, M.Lima, M.Oliveira et al. // International journal of electrochemical science. 2016. Vol. 12. P. 1247-1262. DOI: 10.20964/2017.02.18

21. Environmental Applications of Boron-Doped Diamond Electrodes: 2. Soil Remediation and Sensing Applications / C.Trellu, S.Chakraborty, P.V.Nidheesh, M.A.Oturan // ChemElectroChem. 2019. Vol. 6. P. 2143-2156. DOI: 10.1002/celc.201801877

22. *Ferrarese E.* Application of Electrochemical Techniques for the Remediation of Soils Contaminated With Organic Pollutants / E.Ferrarese, G.Andreottola // Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy. 2010. Vol. 13. P. 343-372.

23. *Ganiyu S.O.* 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 / S.O.Ganiyu, M.Gamal El-Din // Applied Catalysis B: Environmental. 2020. Vol. 279. № 119366. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.119366

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

24. *Ganiyu S.O.* Nature, Mechanisms and Reactivity of Electrogenerated Reactive Species at Thin-Film Boron-Doped Diamond (BDD) Electrodes during Electrochemical Wastewater Treatment / S.O.Ganiyu, C.A.Martínez-Huitle // ChemElectroChem. 2019. Vol. 6. Iss. 9. P. 2379-2392. DOI: 10.1002/celc.201900159

25. *Ganiyu S.O.* Renewable energies driven electrochemical wastewater/soil decontamination technologies: A critical review of fundamental concepts and applications / S.O.Ganiyu, C.A.Martinez-Huitle, M.A.Rodrigo // Applied Catalysis B: Environmental. 2020. Vol. 270. № 118857. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.118857

26. *Gomes H.I.* Electrokinetic remediation of organochlorines in soil: enhancement techniques and integration with other remediation technologies / H.I.Gomes, C.Dias-Ferreira, A.B.Ribeiro // Chemosphere. 2012. Vol. 87. Iss. 10. P. 1077-1090. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.02.037

27. *Istrate I.* An alternative to the treatment of leachate contaminated soil / I.Istrate, T.Apostol, A.Badea // Ecoterra. 2014. Vol. 11. № 2. P. 78-84.

28. *Jamaly S.* Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities / S.Jamaly, A.Giwa, S.W.Hasan // Journal of environmental sciences. 2015. Vol. 37. P. 15-30. DOI: 10.1016/j.jes.2015.04.011

29. *Korolev V.A.* Electrokinetic remediation of oil-contaminated soils / V.A.Korolev, O.V.Romanyukha, A.M.Abyzova // Journal of Environmental Science and Health. Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering. 2008. Vol. 43. Iss. 8. P. 876-880. DOI: 10.1080/10934520801974384

30. *Lawrence M.Z.* Electrochemical Geo-Oxidation (ECGO) treatment of Massachusetts New Bedford Harbor sediment PCBs / M.Z.Lawrence, J.W.Kenneth, S.Pamukcu // Electrochimica Acta. 2020. Vol. 354. № 136690. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136690

31. *Pryanichnikova V.V.* The Electrochemical Cleaning of Various Types of Soils Contaminated with Reservoir Water and Oil / V.V.Pryanichnikova, N.S.Shulaev, R.R.Kadyrov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 272. Iss. 2. № 022039. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022039

32. The electrochemical method of oil-contaminated soil remediation / V.V.Pryanichnikova, N.S.Shulaev, N.A.Bykovsky, R.R.Kadyrov // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 743. P. 314-318. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.314

33. Treatment of ex-situ soil-washing fluids polluted with petroleum by anodic oxidation, photolysis, sonolysis and combined approaches / E.Dos santos, C.Saez, P.Canizares et al. // Chemical Engineering Journal. Vol. 310. Part 2. P. 581-588. DOI: 10.1016/j.cej.2016.05.015

34. *Tican A.* Electro-oxidation treatment used for the remediation of organic polluted soils / A.Tican, I.Istrate // UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2014. Vol. 76. Iss. 4. P. 215-222.

35. *Zhou W.* Activated carbon as effective cathode material in iron-free Electro-Fenton process: Integrated H_2O_2 electrogeneration, activation, and pollutants adsorption / W.Zhou, L.Rajic, L.Chen // Electrochimical Acta. 2018. Vol. 296. P. 317-326. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.11.052

***Авторы*: Н.С.Шулаев,** *д-р техн. наук, профессор, https://orcid.org/0000-0002-3595-6948* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Стерлитамак, Стерлитамак, Россия*), **В.В.Пряничникова**, *канд. техн. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0001-8997-5186* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Стерлитамак, Стерлитамак, Россия*), **Р.Р.Кадыров,** *канд. техн. наук, доцент, r_kadyrov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6665-9375* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Стерлитамак, Стерлитамак, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0