

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ
ОЧИСТКИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ**

**В.П. Мешалкин^{1,2}, Н.С. Шулаев³, Р.Р. Кадыров³,
В.В. Пряничникова³, Н.Н. Кулов⁴, А.В. Гарабаджиу⁵**

¹Международный институт логистики ресурсосбережения и технологической инноватики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская площадь, 9, Москва, Россия, 125047

E-mail: vpmeshalkin@gmail.com

²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский пр., 31 к. 4, Москва, Россия, 119071

³Уфимский государственный нефтяной технический университет, Институт химических технологий и инжиниринга, пр. Октября, 2, Стерлитамак, Республика Башкортостан, 453118

E-mail: nshulayev@rambler.ru, r_kadyrov@mail.ru, prvaleria@mail.ru

⁴Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр., 31, ГСП-1, В-71, Москва, Россия, 119991

E-mail: kulov@igic.ras.ru

⁵Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Московский пр., 26, Санкт-Петербург, Россия, 190013

E-mail: nich@technolog.edu.ru

Экологические проблемы, связанные с загрязнением грунтов нефтепродуктами, с годами приобретают все большую остроту и требуют эффективных и рациональных технико-экономических решений. Электрохимический метод представляет собой одно из таких решений, позволяющих восстанавливать нефтезагрязненные грунты. Проведенные экспериментально-теоретические исследования позволили разработать физико-химические и технологические основы нового ресурсосберегающего и энергоэффективного электрохимического процесса очистки грунтов от нефти, нефтепродуктов и высокоминерализованных вод непосредственно на месте загрязнения (in situ) без проведения трудоемких, высокочемических земляных работ и применения специальных химических реагентов. Были теоретически получены, а затем экспериментально подтверждены закономерности снижения содержания нефтепродуктов в очищаемых грунтах различного типа с учетом рельефа местности при пропускании через них постоянного тока малой величины. Выявленные закономерности позволили предложить схемы размещения электродов, обеспечивающие равномерность очистки благодаря созданию электрического поля близкого к однородному даже с учетом неравномерного загрязнения отдельных участков очищаемой территории и ее рельефа. На основе таких схем разработаны установки эффективной очистки грунта с пониженным энергопотреблением для аппаратной реализации электрохимического процесса. Для различных модификаций установок, выбираемых в зависимости от загрязненности и рельефа местности, предусмотрено применение единого источника электрической энергии. На участках с углублениями возможно использование монокатодных (катодоцентрических) схем, где в центре расположен один катод, а по периметру - аноды. Предложены методики расчета основных технико-энергетических и экономических показателей электрохимического процесса очистки грунтов, загрязненных нефтепродуктами, учитывающие силу электрического тока и напряжение, параметры и количество подключаемых электродов, свойства очищаемого почвенного массива, особенности распределения загрязняющих веществ по территории, требуемую степень очистки.

Ключевые слова: электрохимическая очистка, нефтезагрязненный грунт, электроды, рельеф

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF ELECTROCHEMICAL PURIFICATION OF OIL-CONTAMINATED SOILS TAKING INTO ACCOUNT THE TERRAIN

V.P. Meshalkin^{1,2}, N.S. Shulaev³, R.R. Kadyrov³, V.V. Pryanichnikova³, N.N. Kulov⁴, A.V. Garabadzhiu⁵

¹International Institute of Logistics of Resource Conservation and Technological Innovation, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Miusskaya Sq., 9, Moscow, Russian Federation, 125047

²Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Leninsky Prospekt, 31 building 4, Moscow, Russian Federation, 119071

³Ufa State Petroleum Technological University, Institute of Chemical Technologies and Engineering, October av., Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, 2453118

⁴N.S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Leninsky pr., 31, GSP-1, V-71, Moscow, Russian Federation, 119991

⁵Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), Moskovsky Ave., 26, Saint Petersburg, Russian Federation, 190013

Environmental problems associated with soil contamination with petroleum products have become increasingly acute over the years and require effective and rational technical and economic solutions. The electrochemical method is one of such solutions that allow the oil-contaminated soils remediation. The experimental and theoretical studies made it possible to develop the physico-chemical and technological foundations of a new resource-saving and energy-efficient electrochemical process for cleaning soils from oil, petroleum products and highly mineralized waters directly at the pollution site (in situ) without labor-intensive, high-cost excavation and the use of special chemical reagents. The regularities of reducing the petroleum products content in the treated soils of various types, taking into account the terrain, were theoretically obtained and then experimentally confirmed when a small DC current was passed through them. The revealed patterns allowed us to propose electrode placement schemes that ensure uniformity of cleaning by creating an electric field close to uniform, even taking into account uneven contamination of individual sections of the territory being cleaned and its relief. On the basis of such schemes, installations for effective soil cleaning with reduced energy consumption have been developed for the hardware implementation of the electrochemical process. For various modifications of installations selected depending on pollution and terrain, the use of a single source of electrical energy is provided. It is possible to use monocation (cathodocentric) circuits in areas with depressions, where one cathode is located in the center, and anodes are located along the perimeter. The methods of calculation of the main technical, energy and economic parameters of the electrochemical process of cleaning soils contaminated with petroleum products are proposed, taking into account the amperage and voltage, parameters and number of connected electrodes, properties of the cleaned soil massive, features of the pollutants distribution over the territory, the required degree of purification.

Key words: electrochemical cleaning, oil-contaminated soil, electrodes, terrain

Для цитирования:

Мешалкин В.П., Шулаев Н.С., Кадыров Р.Р., Пряничникова В.В., Кулов Н.Н., Гарабаджиу А.В. Экспериментально-теоретические исследования электрохимической очистки нефтезагрязненных грунтов с учетом рельефа местности. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2022. Т. LXVI. № 3. С. 29–36. DOI: 10.6060/rcj.2022663.5.

For citation:

Meshalkin V.P., Shulaev N.S., Kadyrov R.R., Pryanichnikova V.V., Kulov N.N., Garabadzhiu A.V. Experimental and theoretical studies of electrochemical purification of oil-contaminated soils taking into account the terrain. *Ros. Khim. Zh.* 2022. V. 66. N 3. P. 29–36. DOI: 10.6060/rcj.2022663.5.

ВВЕДЕНИЕ

В результате аварий или утечек на нефтяных и газовых месторождениях, а также вдоль тру-

бопроводов, транспортирующих нефть и ее продукты, возникают и увеличиваются участки загрязненного грунта. Большой масштаб подобных загрязнений и их негативное влияние на экологи-

ское состояние территорий определяют актуальность исследований по очистке грунтов от нефти и нефтепродуктов. Одним из способов решения этой проблемы является электрохимическая обработка нефтезагрязненных почв, основанная на пропускании электрического тока при относительно низком напряжении, приводящая к уменьшению концентрации нефтепродуктов и восстановлению свойств почв. Достоинствами электрохимического метода обработки загрязненных грунтов являются эффективность, экономичность и мобильность [1–4]. Применение этого метода позволяет осуществлять очистку грунта на глубине до нескольких метров *in situ*. Кроме того, электрохимическая обработка грунта способствует его очистке от фенолов, солей, тяжелых металлов, других веществ [5–9].

Анализ современных исследований в области электрохимической очистки грунтов нефтью и нефтепродуктами позволяет выделить ряд направлений. Например, отечественные ученые определяют состояние грунта после электрохимической очистки от бензина и отработанного масла с растворителем, осуществляя измерения удельного электрического сопротивления, влажности, плотности, размера почвенных фракций [10, 11]. Румынские и итальянские ученые разрабатывают методики, совмещающие электрокинетическую очистку и биоремедиацию [12–14]. Некоторые аналитические статьи посвящены электрокинетическим процессам и анодному окислению для очистки грунтов с различными загрязнителями [15–17], а также анализу материалов, используемых для изготовления электродов [18–23]. Отдельные работы освещают вопросы применения возобновляемых источников энергии при электрохимических процессах очистки [24, 25].

Рассмотрение данных работ показывает, что традиционно электрохимический метод очистки грунта от загрязнений осуществляется заглублением чередующихся в определенном порядке катодов и анодов, представляющих собой стержни или пластины.

В ходе проводимых нами и другими учеными экспериментов была установлена высокая степень очистки нефтезагрязненных грунтов при пропускании постоянного электрического тока небольшой величины [26, 27].

В отличие от приведенных выше исследований нами проведен анализ пространственного распределения в межэлектродной зоне основных физико-химических параметров нефтезагрязненных грунтов в процессе электрохимической очистки. В

частности, исследовалось распределение температуры, влажности, кислотности в прикатодной, центральной и прианодной областях [28]. Однако, обозначенные материальные и экологические проблемы требуют совершенствования подходов к проектированию новых установок, осуществлению современного инжиниринга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения закономерностей протекания процесса электрохимической обработки грунтов и оценки целесообразности применения данной технологии на загрязненных участках проводились исследования по очистке различных типов грунтов (суглинки, глина, песок), загрязненных нефтью и нефтепродуктами в широком диапазоне концентраций, а также сопутствующими им пластовыми водами.

Эксперименты проводились на лабораторной установке, состоявшей из ячейки в форме параллелепипеда и графитовых электродов, подключенных к аналоговому источнику питания АТН-1031. По нефтезагрязненному грунту пропускался электрический ток плотностью 42,55, 127,66, 212,77, 340,43 А/м², время обработки варьировалось в пределах 30-90 мин. Дополнительно проводилась серия опытов с временем обработки 300 мин.

Определение содержания нефтепродуктов осуществлялось методом инфракрасной спектроскопии.

Начальная концентрация нефти в грунте изменялась от 1100 до 11000 мг/кг почвы, содержание высокоминерализованных пластовых вод составляло 408,9 г/кг.

Установлено, что при пропускании определенного электрического заряда происходит снижение содержания нефтепродуктов в глинистом грунте на 84,52%, в суглинках - от 75 до 77,1%, в песке – 69,03%. Такая закономерность объясняется различными физико-химическими характеристиками грунтов, такими как дисперсность, содержание токопроводящих микрокомпонентов. Основными процессами, происходящими в межэлектродном пространстве являются: электрокинетические процессы; прямое окисление за счет O₂, ClO⁻, O₃, Cl₂, HClO; не прямое окисление за счет H₂O₂, OH⁻.

Определяющим параметром электрообработки является величина пропускаемого через нефтезагрязненный грунт электрического заряда

$$q = \int I(t)dt, \quad (1)$$

где I – сила тока, А;

t – время обработки, ч.

Установлено, что при пропускании через загрязненную почву электрического заряда, превышающего определенную величину, концентрация нефтепродуктов практически не меняется.

Во всех случаях наблюдается экспоненциальная зависимость снижения концентрации нефтепродуктов в грунте от количества пропущенного заряда

$$C(t) = C_0 e^{-alt} + C_1 = C_0 e^{-\alpha q(t)} + C_1, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация нефтепродуктов, кг/м³;

C_1 – остаточная концентрация, кг/м³;

$q(t)$ – заряд, прошедший через грунт, Кл;

α – коэффициент, зависящий от вида нефтезагрязненного грунта и массы нефтепродуктов на очищаемом участке, 1/Кл

$$\alpha = \frac{1}{C_0 V q_{уд}}, \quad (3)$$

V – объем загрязненного грунта, м³;

$q_{уд}$ – удельный заряд (для глинистого грунта 6,3·МКл/кг, для чернозема 9,6 МКл/кг, для суглинка 9,3 МКл/кг, для песчаного грунта 13,4 МКл/кг [26]).

Раствор солей выступает в роли электропроводящей среды и нивелирует влияние почвенных характеристик. При снижении содержания раствора электролитов удельное сопротивление почв будет определяться их физико-химическим составом.

Важным условием, позволяющим повысить эффективность очистки грунта, является однородность электрического поля между электродами. Поле такой конфигурации можно создать между катодом и анодом в виде прямоугольных пластин, но их установка в грунт более трудозатратна, чем цилиндрических электродов.

Рассмотрено несколько схем размещения и конструкций электродов с целью наиболее эффективной очистки нефтезагрязненных грунтов с учетом рельефа местности [29, 30].

При равномерном загрязнении грунта на равнинной местности для получения более однородного электрического поля между электродами целесообразно размещать аноды и катоды в «шахматном» порядке и соединять их отдельными шинами (рис. 1).

Особенностью размещения электродов по схеме на рис. 1 является повышение проводимости за счет получения между электродами электрического поля, приближенного к однородному.

Суммарный ток между электродами можно определить по формуле

$$I_s = \frac{\pi S H}{L^2 \rho \ln \frac{L}{R}} U, \quad (4)$$

где U – напряжение между электродами, В;
 ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;
 R – радиус электрода, м;
 L – расстояние между катодом и анодом, м;
 H – глубина погружения электродов, м;
 S – площадь загрязненного участка, м².

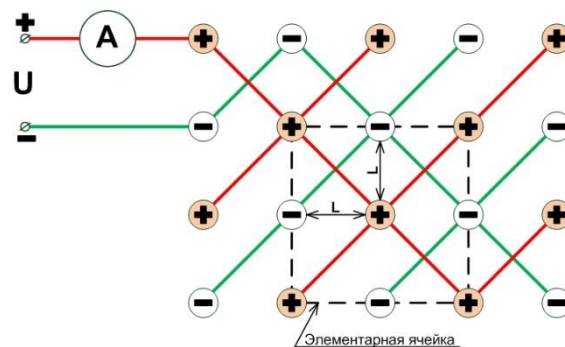


Рис. 1. Схема расположения электродов

Величина энергопотребления составит

$$W_s = I_s U t. \quad (5)$$

Время проведения электрообработки можно найти по формуле

$$t = \frac{1}{\alpha I} \left| \ln \left[\frac{C_0 - C_1}{C(t) - C_1} \right] \right|, \quad (6)$$

где $C(t)$ – концентрация нефтепродуктов в момент времени t , кг/м³.

Полученные формулы позволяют рассчитывать энергозатраты и время обработки при равномерном загрязнении грунта на равнинной местности. Для анализа явлений в межэлектродном пространстве проведены экспериментальные исследования.

Также проведены экспериментальные исследования изменения влажности, температуры, степени кислотности нефтезагрязненных грунтов в межэлектродном пространстве в зависимости от времени обработки при использовании графитовых и металлических электродов [28].

На рис.2 и 3 представлены зависимости изменения температуры, влажности, степени кислотности во времени на разных расстояниях от графитовых электродов (от анода к катоду).

Из анализа данных, приведенных на рис. 2, можно сделать вывод, что проводимость у анода и катода выше, чем между электродами. На рис. 3 видно, что между электродами преобладает кислотная среда, кроме прикатодной части, где высокий уровень рН.

В реальности рельеф местности может быть сложным, степень загрязнения разной и «шахматная схема» не будет достаточно эффективной. Для местности с углублениями и неравномер-

ной загрязненностью предлагается применение монокатодных (катодоцентрических) схем. Отдельная монокатодная схема состоит из стальной перфорированной металлической трубы с установленной во внутренней полости водоотводной арматуры для удаления загрязненной жидкости, а положительные электроды-аноды, выполненные из цилиндрических графитовых стержней, устанавливаются по периферии загрязненного участка на равноудаленном от катода расстоянии. Электроды подключаются к источнику постоянного электрического тока и погружаются в грунт на глубину загрязнения.

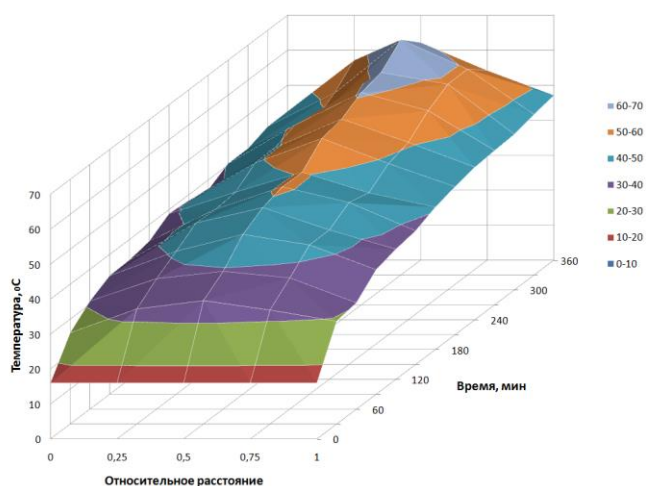


Рис. 2. Изменение температуры во времени на разных расстояниях от электродов

На рис. 4 показано расположение электродов у группы связанных между собой монокатодных схем для осуществления очистки нефтезагрязненных грунтов и извлечения загрязненной жидкости.

Предложенное размещение электродов создает на загрязненном участке электрическое поле

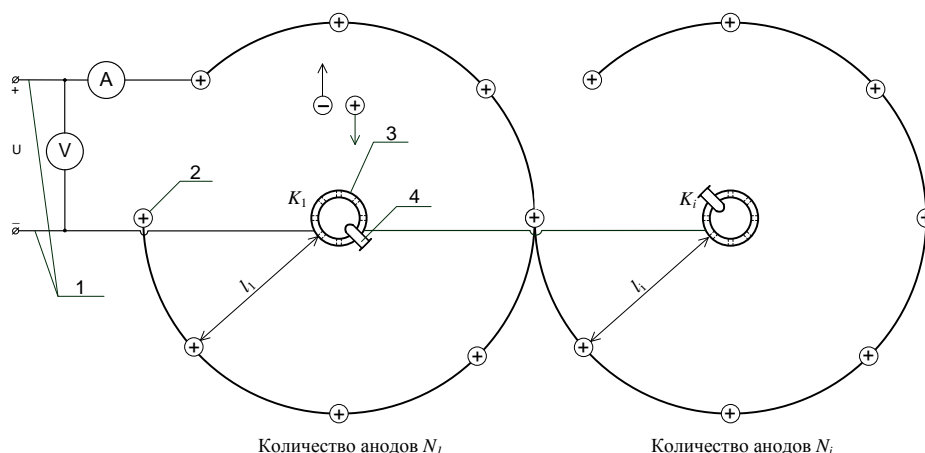


Рис. 4. Схема размещения электродов: 1 – источник электрического тока, подключаемый к выводам; 2 – цилиндрические аноды; 3 – катод; 4 – арматура для удаления загрязненной жидкости

для равномерной очистки грунта от нефтепродуктов по всему объему. Электрический ток между электродами при таком размещении можно определить

$$I = \sum \frac{U_i S_i N_i}{\rho_i l_i}, \quad (7)$$

где i – число катодов, установленных на обрабатываемом участке, шт;

U_i – напряжение между анодами и i катодом, В;

ρ_i – удельное сопротивление грунта вокруг i катода, Ом·м;

N_i – число анодов вокруг i катода, шт;

$S_i = \frac{d_k + d_a}{2} H$ – эффективная площадь канала электрического тока между анодом и i катодом, м²;

$l_i = R_{ak} - \frac{d_k + d_a}{2}$ – межэлектродное расстояние между i катодом и анодами, м;

R_{ak} – расстояние между центрами анодов и катода, м;

d_k, d_a – диаметры катода и анодов, м.

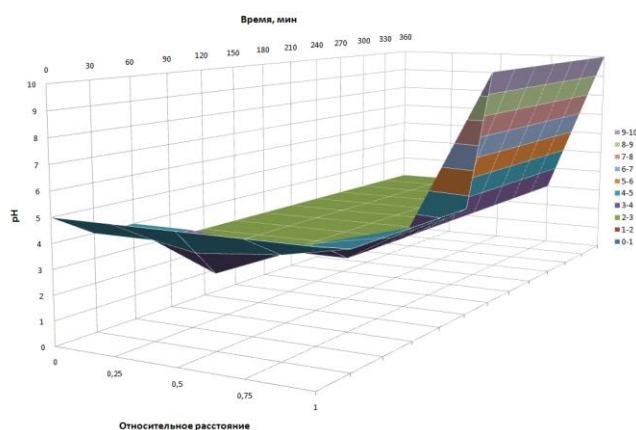


Рис. 3. Изменение pH во времени на разных расстояниях от электродов

Затраченное на очистку время, в зависимости от объема загрязненного грунта, определяется по формуле

$$t = \frac{q_{уд} C \pi R_{ак}^2 H \rho l}{USN} \quad (8)$$

Величина энергопотребления составит

$$W = IUt. \quad (9)$$

Значения тока I и напряжения U при заданных размерах катода и анодов устанавливают, исходя из требуемой степени очистки и времени обработки грунта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования продемонстрировали высокую эффективность электрохимического метода для снижения и минимизации негативного влияния нефтяного загрязнения на грунты и экосистему. При относительно высоком содержании растворов солей в пластовых водах удельное сопротивление нефтезагрязненных грунтов, определяющее энергозатраты, зависит преимущественно от концентрации ионов солей. При пропускании через загрязненный грунт низкоамперного электрического тока наблюдается экспоненциальное снижение концентрации нефтепродуктов. Установлено, что для каждого типа грунтов существует предельная величина электрического заряда, при достижении которой концентрация нефтепродуктов изменяется. Эта величина заряда составляет для глины – 6,3, для суглинка – 9,3, для песка - 13,4 МКл/кг.

Из проведенных исследований следует, что электрохимическая обработка при малом напряжении не оказывает негативного влияния на характеристики почв, сохраняется их плодородие, при этом происходит снижение токсичности грунтов до малоопасного значения.

Анализ предложенных схем показывает, что при проведении электрохимической очистки в полевых условиях при равномерном загрязнении и равнинной местности для уменьшения энергозатрат целесообразно «шахматное» размещение ци-

линдрических катодов и анодов параллельными батареями, позволяющее при соответствующем соотношении между размерами электродов и расстояния между ними создавать в межэлектродном пространстве электрическое поле, близкое к однородному.

При очистке участков со сложным рельефом более эффективна монокатодная схема, так как в имеющиеся углубления можно устанавливать катоды, из полости которых возможно извлечение скапливающейся нефтезагрязненной жидкости.

ВЫВОДЫ

Анализ изменения параметров (температуры, влажности, степени кислотности) между электродами и во времени позволяет определить закономерности протекающих в грунте процессов, приводящих к снижению концентрации нефтепродуктов, что необходимо учитывать при проектировании конкретных установок электрохимической очистки.

Предлагаемые в статье схемы и конструкции установок позволяют адаптировано подходить к электрохимической очистке грунтов от нефтезагрязнений с учетом концентрации нефтепродуктов и рельефа местности, поэтому они могут найти широкое применение для восстановления грунтов.

Существенными достоинствами предлагаемых установок являются осуществление равномерной степени очистки территорий с различной концентрацией загрязнения, энергоэффективность при высокой производительности, простота развертывания и эксплуатации.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ (проект № 21-79-30029).

This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-79-30029).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Vocciante M., Dovi V.G., Ferro S.* Sustainability in Electro-Kinetic Remediation Processes: A Critical Analysis. Sustainability. 2021. V. 13. P. 770. DOI: 10.3390/su13020770.
2. *Шабанов Е.А., Простов С.М., Герасимов О.В.* Лабораторные исследования процессов электрохимической очистки грунтов в основаниях эксплуатируемых зданий и сооружений от нефтепродуктов. Вестник Томского гос. архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 4. С. 168–180. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-168-180.
3. *Мешалкин В.П., Шулаев Н.С., Пряничникова В.В.* Экспериментально-теоретический инжиниринг энергоэффективного электрохимического процесса очистки почвы от нефтяных загрязнений. Доклады Российской Академии наук. 2020. Т. 491. С. 15–19. DOI: 10.31857/S2686953520020053.

REFERENCES

1. *Vocciante M., Dovi V.G., Ferro S.* Sustainability in Electro-Kinetic Remediation Processes: A Critical Analysis. Sustainability. 2021. V. 13. P. 770. DOI: 10.3390/su13020770.
2. *Shabanov E.A., Prostov S.M., Gerasimov O.V.* Laboratory studies of the processes of electrochemical cleaning of soils in the bases of operated buildings and structures from oil products. Bulletin of the Tomsk state. architectural and civil engineering university. 2019. V. 21. N 4. P. 168–180 (in Russian). DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-168-180.
3. *Meshalkin V.P., Shulaev N.S., Pryanichnikova V.V.* Experimental and theoretical engineering of energy-efficient electrochemical process of soil remediation to remove oil contaminants. Doklady chemistry. 2020. V. 491. P. 15–19 (in Russian). DOI: 10.31857/S2686953520020053.

4. *Korolev V.A., Nesterov D.S.* Итоги международной конференции EREM-2017 - Электрокинетическая очистка грунтов от загрязнений. Инженерные изыскания. 2017. Т. 10. С. 14–22. DOI: 10.25296/1997-8650-2017-10-14-22.
5. *Lawrence M.Z., Kenneth J.W., Pamukcu S.* Electrochemical Geo-Oxidation (ECGO) treatment of Massachusetts New Bedford Harbor sediment PCBs. *Electrochimica Acta*. 2020. V. 354. P. 136690. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136690.
6. *Cameselle C., Gouveia S., Cabo A.* Enhanced Electrokinetic Remediation for the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soils. *Appl. Sci.* 2021. V. 11. P. 1799. DOI: 10.3390/app11041799.
7. *Choudhury Sh.P., Kalamdhad A.S.* Optimization of electrokinetic pretreatment for enhanced methane production and toxicity reduction from petroleum refinery sludge. *Journal of Environmental Management*. 2021. V. 298. P. 113469. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113469.
8. *Jamaly S., Giwa A., Hasan S.W.* Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities. *Journal of environmental sciences*. 2015 V. 37. P. 15–30. DOI: 10.1016/j.jes.2015.04.011.
9. *Rada E. Istrate I., Ragazzi M., Andreottola G., Torretta V.* Analysis of Electro-Oxidation Suitability for Landfill Leachate Treatment through an Experimental Study. *Sustainability*. V. 5(9). P. 3960–3975. DOI: 10.3390/su5093960.
10. *Шабанов Е.А., Простов С.М., Герасимов О.В.* Натурные исследования процессов загрязнения нефтепродуктами и электрохимической очистки грунтов оснований сооружений на опытном полигоне. Вестник Томского гос. архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 5. С. 151–164. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-5-151-164.
11. *Prostov S., Shabanov E.* Investigations of electrophysical monitoring in a full-scale experiment to clean soil contaminated with oil. *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 177. P. 1–9. DOI: 10.1051/e3sconf/202017704003.
12. *Crognale S., Cocarta D., Streche C., D'Annibale A.* Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils. *New Biotechnology*. 2020. V. 58. P. 38–44. DOI: 10.1016/j.nbt.2020.04.002.
13. *Haider F.U., Ejaz M., Cheema S.A., Imran Khan M., Zhao B., Liqun C., Salim M.A., Naveed M.* Phytotoxicity of petroleum hydrocarbons: Sources, impacts and remediation strategies. *Environmental Research*. 2021. V. 197. 111031. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111031.
14. *Ferreira A.R., Guedes P., Mateus E.P., Jensen P.E., Ribeiro A.B., Couto N.* Hydrocarbon-Contaminated Soil in Cold Climate Conditions: Electrokinetic-Bioremediation Technology as a Remediation Strategy. *Electrokinetic Remediation for Environmental Security and Sustainability*. NY: John Wiley & Sons Ltd. 2021. P. 173–190. DOI: 10.1002/9781119670186.ch8.
15. *Wang F., Stahl Sh. S.* Electrochemical Oxidation of Organic Molecules at Lower Overpotential: Accessing Broader Functional Group Compatibility with Electron-Proton Transfer Mediators. *Accounts of Chemical Research*. 2020. V. 53 (3). P. 561–574. DOI: 10.1021/acs.accounts.9b00544.
16. *Abdalrhman A.S., Ganiyu S.O., Gamal El-Din M.* Degradation kinetics and structure-reactivity relation of naphthenic acids during anodic oxidation on graphite electrodes. *Chem. Eng. J.* 2019. V. 370. P. 997–1007. DOI: 10.1016/j.cej.2019.03.281.
17. *Ferreira M.B., Sales Solano A. M., Santos E.V., Martínez-Huitle C.A., Ganiyu S.O.* Coupling of Anodic Oxidation and Soil Remediation Processes: A Review. *Materials*. 2020. V. 13 (19). DOI: 10.3390/ma13194309.
18. *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
4. *Korolev V.A., Nesterov D.S.* Results of the international conference EREM-2017 - Electrokinetic cleaning of soils from pollution. *Engineering survey*. 2017. V. 10. P. 14–22 (in Russian). DOI: 10.25296/1997-8650-2017-10-14-22.
5. *Lawrence M.Z., Kenneth J.W., Pamukcu S.* Electrochemical Geo-Oxidation (ECGO) treatment of Massachusetts New Bedford Harbor sediment PCBs. *Electrochimica Acta*. 2020. V. 354. P. 136690. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136690.
6. *Cameselle C., Gouveia S., Cabo A.* Enhanced Electrokinetic Remediation for the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soils. *Appl. Sci.* 2021. V. 11. P. 1799. DOI: 10.3390/app11041799.
7. *Choudhury Sh.P., Kalamdhad A.S.* Optimization of electrokinetic pretreatment for enhanced methane production and toxicity reduction from petroleum refinery sludge. *Journal of Environmental Management*. 2021. V. 298. P. 113469. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113469.
8. *Jamaly S., Giwa A., Hasan S.W.* Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities. *Journal of environmental sciences*. 2015 V. 37. P. 15–30. DOI: 10.1016/j.jes.2015.04.011.
9. *Rada E. Istrate I., Ragazzi M., Andreottola G., Torretta V.* Analysis of Electro-Oxidation Suitability for Landfill Leachate Treatment through an Experimental Study. *Sustainability*. V. 5(9). P. 3960–3975. DOI: 10.3390/su5093960.
10. *Shabanov E.A., Prostov C.M., Gerasimov O.V.* Field studies of the processes of pollution by oil products and electrochemical cleaning of soils of the foundations of structures at an experimental site. *Bulletin of the Tomsk state. architectural and civil engineering university*. 2019. V. 21. N 5. P. 151–164 (in Russian). DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-5-151-164.
11. *Prostov S., Shabanov E.* Investigations of electrophysical monitoring in a full-scale experiment to clean soil contaminated with oil. *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 177. P. 1–9. DOI: 10.1051/e3sconf/202017704003.
12. *Crognale S., Cocarta D., Streche C., D'Annibale A.* Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils. *New Biotechnology*. 2020. V. 58. P. 38–44. DOI: 10.1016/j.nbt.2020.04.002.
13. *Haider F.U., Ejaz M., Cheema S.A., Imran Khan M., Zhao B., Liqun C., Salim M.A., Naveed M.* Phytotoxicity of petroleum hydrocarbons: Sources, impacts and remediation strategies. *Environmental Research*. 2021. V. 197. 111031. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111031.
14. *Ferreira A.R., Guedes P., Mateus E.P., Jensen P.E., Ribeiro A.B., Couto N.* Hydrocarbon-Contaminated Soil in Cold Climate Conditions: Electrokinetic-Bioremediation Technology as a Remediation Strategy. *Electrokinetic Remediation for Environmental Security and Sustainability*. NY: John Wiley & Sons Ltd. 2021. P. 173–190. DOI: 10.1002/9781119670186.ch8.
15. *Wang F., Stahl Sh. S.* Electrochemical Oxidation of Organic Molecules at Lower Overpotential: Accessing Broader Functional Group Compatibility with Electron-Proton Transfer Mediators. *Accounts of Chemical Research*. 2020. V. 53 (3). P. 561–574. DOI: 10.1021/acs.accounts.9b00544.
16. *Abdalrhman A.S., Ganiyu S.O., Gamal El-Din M.* Degradation kinetics and structure-reactivity relation of naphthenic acids during anodic oxidation on graphite electrodes. *Chem. Eng. J.* 2019. V. 370. P. 997–1007. DOI: 10.1016/j.cej.2019.03.281.
17. *Ferreira M.B., Sales Solano A. M., Santos E.V., Martínez-Huitle C.A., Ganiyu S.O.* Coupling of Anodic Oxidation and Soil Remediation Processes: A Review. *Materials*. 2020. V. 13 (19). DOI: 10.3390/ma13194309.
18. *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. *Appl. Catal. B Environ.* 2020. V. 279. 119366. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.119366.
19. Ganiyu S.O., Martinez-Huitle C.A. Nature, Mechanisms and Reactivity of Electrogenerated Reactive Species at Thin-Film Boron-Doped Diamond (BDD) Electrodes during Electrochemical Wastewater Treatment. *ChemElectroChem.* 2019. V. 6. N 9. P. 2379–2392. DOI: 10.1002/celec.201900159.
 20. Ganiyu S.O., Oturan N., Trelu C., Raffy S., Cretin M., Causserand C., Oturan M.A. Electrochemical Abatement of Analgesic Antipyretic 4-Aminophenazone using Conductive Boron-Doped Diamond and Sub-Stoichiometric Titanium Oxide Anodes: Kinetics, Mineralization and Toxicity Assessment. *ChemElectroChem.* 2019. V. 6. N 6. P. 1808–1817. DOI: 10.1002/celec.201801741.
 21. Trelu C., Chakraborty S., Nidheesh P.V., Oturan M.A. Environmental Applications of Boron-Doped Diamond Electrodes: 2. Soil Remediation and Sensing Applications. *ChemElectroChem.* 2019. V. 6. N 8. P. 2143–2156. DOI: 10.1002/celec.201801877.
 22. Желовицкая А.В., Дресвянников А.Ф. Электродные материалы, применяемые для генерирования активных радикалов при обработке сточных вод. Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 4. С. 107–112.
 23. Zhou W., Rajic L., Chen L. Activated carbon as effective cathode material in iron-free Electro-Fenton process: Integrated H₂O₂ electrogeneration, activation, and pollutants adsorption. *Electrochimical Acta.* 2018. V. 296. P. 317–326. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.11.052.
 24. Ganiyu S.O., Martinez-Huitle C.A. The use of renewable energies driving electrochemical technologies for environmental applications. *Curr. Opin. Electrochem.* 2020. V. 22. P. 211–220. DOI: 10.1016/j.coelec.2020.07.007.
 25. Ganiyu S.O., Martinez-Huitle C.A., Rodrigo M.A. Renewable energies driven electrochemical wastewater/soil decontamination technologies: A critical review of fundamental concepts and applications. *Appl. Catal. B Environ.* 2020. V. 270. 118857. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.118857.
 26. Meshalkin V.P., Shulaev N.S., Chelnokov V.V., Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R. Determination of electrical parameters for the electrochemical treatment of soils contaminated with oil. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 537. N 6. 062069 DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062069.
 27. Streche C., Cocarta D., Istrate I., Badea A. Decontamination of Petroleum-Contaminated Soils Using The Electrochemical Technique: Remediation Degree and Energy Consumption. *Scientific Reports.* 2018. V. 8. DOI: 10.1038/s41598-018-21606-4.
 28. Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р. Закономерности электрохимической очистки нефтезагрязненных грунтов. Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 1–10. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.16.
 29. Шулаев Н.С., Мешалкин В.П., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р., Быковский Н.А. 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.
 30. Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р., Быковский Н.А., Овсянникова И.В. Воздействие электрического тока на почвы, загрязненные нефтепродуктами. *Бутлеровские сообщения.* 2020. Т. 61. № 2. С. 132–138. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-61-2-132.
 - doped diamond electrode: A case study of oil sands process water treatment. *Appl. Catal. B Environ.* 2020. V. 279. 119366. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.119366.
 19. Ganiyu S.O., Martinez-Huitle C.A. Nature, Mechanisms and Reactivity of Electrogenerated Reactive Species at Thin-Film Boron-Doped Diamond (BDD) Electrodes during Electrochemical Wastewater Treatment. *ChemElectroChem.* 2019. V. 6. N 9. P. 2379–2392. DOI: 10.1002/celec.201900159.
 20. Ganiyu S.O., Oturan N., Trelu C., Raffy S., Cretin M., Causserand C., Oturan M.A. Electrochemical Abatement of Analgesic Antipyretic 4-Aminophenazone using Conductive Boron-Doped Diamond and Sub-Stoichiometric Titanium Oxide Anodes: Kinetics, Mineralization and Toxicity Assessment. *ChemElectroChem.* 2019. V. 6. N 6. P. 1808–1817. DOI: 10.1002/celec.201801741.
 21. Trelu C., Chakraborty S., Nidheesh P.V., Oturan M.A. Environmental Applications of Boron-Doped Diamond Electrodes: 2. Soil Remediation and Sensing Applications. *ChemElectroChem.* 2019. V. 6. N 8. P. 2143–2156. DOI: 10.1002/celec.201801877.
 22. Zhelovitskaya A.V., Dresvyannikov A.F. Electrode materials used to generate active radicals in wastewater treatment. *Bulletin of the Technological University.* 2017. V. 20. N 4. P. 107–112 (in Russian).
 23. Zhou W., Rajic L., Chen L. Activated carbon as effective cathode material in iron-free Electro-Fenton process: Integrated H₂O₂ electrogeneration, activation, and pollutants adsorption. *Electrochimical Acta.* 2018. V. 296. P. 317–326. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.11.052.
 24. Ganiyu S.O., Martinez-Huitle C.A. The use of renewable energies driving electrochemical technologies for environmental applications. *Curr. Opin. Electrochem.* 2020. V. 22. P. 211–220. DOI: 10.1016/j.coelec.2020.07.007.
 25. Ganiyu S.O., Martinez-Huitle C.A., Rodrigo M.A. Renewable energies driven electrochemical wastewater/soil decontamination technologies: A critical review of fundamental concepts and applications. *Appl. Catal. B Environ.* 2020. V. 270. 118857. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.118857.
 26. Meshalkin V.P., Shulaev N.S., Chelnokov V.V., Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R. Determination of electrical parameters for the electrochemical treatment of soils contaminated with oil. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 537. N 6. 062069 DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062069.
 27. Streche C., Cocarta D., Istrate I., Badea A. Decontamination of Petroleum-Contaminated Soils Using The Electrochemical Technique: Remediation Degree and Energy Consumption. *Scientific Reports.* 2018. V. 8. DOI: 10.1038/s41598-018-21606-4.
 28. Shulaev N.S., Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R. Regularities of electrochemical cleaning of oil-contaminated soils. *Notes of the Mining Institute.* 2021. N 252. P. 1–10 (in Russian). DOI: 10.31897/PMI.2021.6.16.
 29. Shulaev N.S., Meshalkin V.P., Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R., Bykovsky N.A. Electrochemical cleaning of oil-contaminated soils taking into account the terrain. *Ecology and industry of Russia.* 2022. V. 26. N 2. P. 9–13 (in Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2022-2-9-13.
 30. Shulaev N.S., Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R., Bykovsky N.A., Ovsyannikova I.V. Impact of electric current on soils contaminated with oil products. *Butlerov communications.* 2020. V.61. N 2. P. 132–138 (in Russian). DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-61-2-132.

Поступила в редакцию (Received) 06.07.2022

Принята к опубликованию (Accepted) 23.08.2022