

УДК 504.062.4

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ГРУНТОВ

© 2024 г. В. П. Мешалкин^а, Н. С. Шулаев^{б, *}, В. В. Пряничникова^б, Р. Р. Кадыров^б

^а *Международный институт логистики ресурсосбережения и технологической инноватики,
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия*

^б *Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Институт химических технологий и инжиниринга ФГБОУ ВО «УГНТУ», Стерлитамак, Россия*

** e-mail: nshulayev@rambler.ru*

Поступила в редакцию 13.11.2023 г.

После доработки 22.01.2024 г.

Принята к публикации 29.01.2024 г.

Образование сложных и разнообразных по составу нефтесодержащих отходов является одной из актуальных экологических проблем нефтяного комплекса, а также следствием возрастающих объемов транспортирования и использования нефти и продуктов ее переработки. К подобным отходам относится и грунт, загрязненный нефтью и нефтепродуктами, который нередко содержит также растворы минеральных солей (в составе попутно добываемых вод), тяжелые металлы и другие компоненты. Перерабатывать и обезвреживать отходы такого рода крайне трудно и затратно, когда речь идет о вывозе и обработке на специализированных полигонах. Более экономичным является физико-химическое воздействие на грунт в полевых условиях, к которому относится и электрохимическая очистка посредством пропускания токов малой величины через загрязненную породу. Несмотря на то, что метод обладает рядом неоспоримых преимуществ, наиболее важными из которых являются возможность создания электрических полей в толще грунта на большой глубине и компактность технических систем, есть ряд факторов, осложняющих процесс. Прежде всего это неоднородность структуры почвы и распределения загрязняющих химических компонентов в очищаемой среде и динамичность влагосодержания (в виду поступления влаги атмосферных осадков). Сложность представляют геохимическое разнообразие и рельеф загрязненной территории. Данная работа посвящена особенностям моделирования процесса физико-химической очистки загрязненных грунтов для последующего проектирования установок с учетом вышеуказанных факторов, определению ключевых параметров их эксплуатации с целью достижения максимальной энергоэффективности и экологичности.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, нефтесодержащий грунт, нефть, нефтепродукты, рельеф, неравномерность, установка

DOI: 10.31857/S0040357124020076, **EDN:** CTYDGV

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с официальными данными общая площадь нефтезагрязненных территорий в России превышает 2.5 млн гектаров [1]. Источниками такого массового загрязнения являются объекты нефтедобычи, производства, специализирующиеся на подготовке и переработке нефти, узлы транспортирования и хранения и даже отдельные транспортные средства в режиме безаварийной эксплуатации. Итогом является образование огромных объемов нефтесодержащих отходов, состав которых варьируется в широких пределах. Наибольшую сложность с точки зрения переработки и снижения токсичности представляют со-

бой нефтеотходы со сложным составом, высоким содержанием механических примесей (в частности, почвенных фракций) или, иными словами, — грунты, загрязненные нефтью или продуктами ее переработки на различную глубину.

Существующие технологии обработки таких отходов подразумевают либо изъятие загрязненного массива с перемещением к месту обработки (полигону или установке) [2], либо осуществление воздействия (химического, биологического, физико-химического) непосредственно в условиях загрязнения (очистка *in situ* — в поле). К последним относятся разновидности методов на основе пропускания электрических токов через почву — электрокинетическая очист-

ка [3, 4], электрохимическая очистка [5, 6], электрокомбинированные технологии [7, 8].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Технологии электроочистки пригодны для удаления нефтяных углеводородов, соединений тяжелых металлов, хлорорганики, минеральных солей [9, 10].

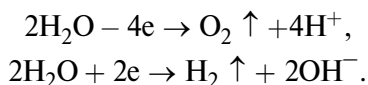
В общем случае обработка нефтезагрязненного грунта осуществляется за счет установки геометрически разнообразных электродов (анодов и катодов) на глубину проникновения поллютантов и подачи электрического напряжения разной величины (как правило, рациональнее является обработка малыми токами).

Механизм очистки почв в результате электрообработки сложен и основан на нескольких процессах. Это электрокинетические процессы, т. е. перемещение частиц загрязнителя под действием электрического тока, электроразогрев, электролиз, окисление, электрофлотация, а также биологическое окисление за счет активизации почвенных нефтеокисляющих микроорганизмов [11]. Электроразогрев может использоваться для удаления более легких фракций нефти, дизельного топлива, летучих углеводородов, а также хлорированных органических растворителей за счет испарения [12].

Перенос веществ в почве под действием электрического поля происходит по нескольким механизмам: диффузии, миграции ионов, электроосмоса и электрофореза. Понятие “электрокинетические явления” включает в себя четыре составляющие: электроосмос, электрофорез, потенциал течения и потенциал седиментации [13]. Особую важность имеют первые два процесса, определяющие характер перемещения загрязняющих веществ вместе с жидкостью, находящейся в почвенных порах [14].

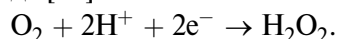
Электроокислительные процессы идут по нескольким направлениям.

При пропускании электрического тока через почву прежде всего происходит окисление воды на аноде с образованием кислой среды и восстановление до водорода на катоде с образованием основного фронта:

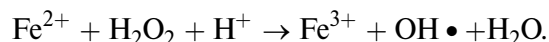


Кислый фронт постепенно перемещается к катоду.

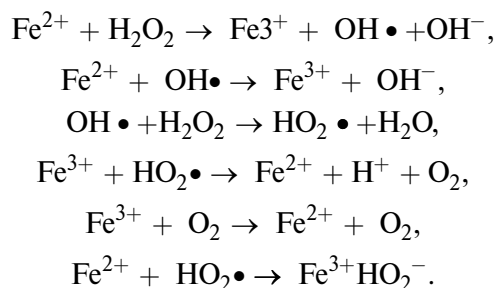
Электрохимически индуцированные процессы окисления включают прямое анодное окисление и косвенное окисление с образованием перекиси водорода [15]:



Косвенное окисление является преобладающим процессом, т. к. прямое окисление может быть эффективно для подвижных загрязнителей, но малоэффективно для неподвижных органических загрязнителей из-за их высоких энергий активации реакций. Косвенное окисление более эффективно и менее энергозатратно, по сравнению с прямым [16]. Поскольку почвы обычно содержат значительное количество железа, как только перекись водорода образуется, в соответствии с реакцией Фентона может быть получен гидроксильный радикал ($\text{OH}^\bullet$):



В данном случае следует говорить о возникновении системы Фентона, которая включает целый ряд химических реакций с образованием радикалов [17]:



Таким образом, при пропускании электрического тока через загрязненный грунт нефтяные углеводороды будут вовлекаться сразу в несколько процессов, среди которых: перемещение вместе с электрофоретическим потоком по направлению от анода к катоду, частичное окисление озоном, молекулярным кислородом и хлором, образующимися в прианодной области, а также окисление гидроксильными радикалами. Гидроксильный радикал способен окислять практически все известные органические соединения, является типичным электрофилом. Он легко вступает в реакцию и с молекулами, содержащими ароматическое кольцо, с замещением -R-групп в боковой цепи на гидроксил и последующим образованием карбоновых и гидрокси-карбоновых кислот.

Протекание электрокинетических и в особенности электрохимических процессов в почвенной среде характеризуется сложностью и вариативностью, т. к. зависит от природно-климатических, геохимических параметров окружающей среды, а также особенностей состава и распределения поллютантов как по горизонтали, так и по вертикали в пределах различных профилей. Поиск оптимальных технологических решений с точки зрения наиболее эффективного массопереноса остается одной из наиболее практически значимых задач при инжиниринге в области электро-

химической обработки нефтесодержащих отходов [18]. Целью данной работы является моделирование процесса физико-химической очистки нефтезагрязненных территорий для последующего проектирования энергоэкономичных и эффективных установок и расчет их параметров с учетом всех указанных особенностей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Авторами данной работы проводились комплексные многолетние исследования в области электрохимической очистки грунтов, загрязненных нефтью и попутно-добываемыми водами (растворами минеральных солей). Исследования включали определение вольт-амперных характеристик и особенности электрохимической очистки на разновидностях суглинка, глины и песка, изучение особенностей очистки грунта с различным содержанием нефтепродуктов (от 1 до 10% загрязнения) при вариациях значений пропускаемых электрических зарядов через массив, определение эффективности очистки, величины удельного предельного электрического заряда, анализ химического состава и токсикологических характеристик [19].

Обобщенная методика проведения экспериментов подразумевала использование лабораторных установок с ячейкой открытого типа и электродами, подключаемыми к источнику постоянного тока. Для различных серий опытов применялось несколько видов ячеек: ячейка из оргстекла в форме параллелепипеда вместимостью 161 см³; удлиненная ячейка из оргстекла общим объемом 2088 см³ и цилиндрическая ячейка из стекла объемом 10603 см³. В ячейку помещался модельный грунт, загрязненный нефтью, а также в некоторых вариациях опытов пластовыми водами с высоким содержанием солей. Грунт увлажнялся до величины 40%, тщательно перемешивался. Пластовые воды включали NaCl, CaCl₂, MgCl₂, Na₂SO₄, NaHCO₃, их содержание первоначально варьировалось от 20 до 408.9 г/кг (впоследствии для большинства экспериментов использовалось максимальное значение) [20].

Пропускаемый электрический заряд составлял до 20000 Кл [20]. Время обработки в разных сериях опытов составляло от 60 до 1440 мин.

Определение содержания нефтепродуктов производилось методом инфракрасной спектроскопии. Для определения прочих параметров использовались также стандартные методики.

К фиксируемым параметрам относились значения силы тока или напряжения, влажность, кислотность, температура среды, удельная электрическая проводимость.

Анализ всего массива полученных в результате экспериментов данных позволил разработать ряд схем размещения электродов и установок для проведения эффективной электрохимической очистки с учетом специфичных условий на их основе [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Варианты энергоэффективных конструкций установок. Проведенные эксперименты позволили прежде всего установить, что концентрация нефтепродуктов в образцах очищаемого грунта снижается при увеличении количества пропускаемого электрического заряда, при этом для каждого типа грунта характерно предельное значение заряда, превышение которого не приводит к изменению концентрации нефтепродуктов. Была выявлена тенденция экспоненциального уменьшения концентрации нефтепродуктов. Степень очистки по нефтепродуктам составляла для глин порядка 84%, для суглинков – 76%, для песка – 69% [22].

Повышение эффективности очистки возможно за счет обеспечения однородности электрического поля между электродами. Это достижимо за счет применения пластинчатых электродов, однако их монтаж в грунте в реальных условиях, особенно при значительной глубине загрязнения, является проблематичным. Рациональнее использование цилиндрических электродов, гораздо более доступных в плане установки и при этом обеспечивающих создание электрических полей, близких к однородным, при соответствующем размещении в пространстве. Оптимальной в данном случае является установка катодов и анодов в шахматном порядке при соединении их отдельными шинами, приведенная на рис. 1.

Плотность электрического тока в междуэлектродном пространстве можно найти по формуле:

$$j = \frac{U}{\rho r \ln \frac{L}{R}},$$

где U – напряжение между электродами;
 ρ – удельное сопротивление;
 R – радиус электрода;
 L – расстояние между катодом и анодом;
 r – расстояние от электрода.

Электрический ток от одного анода будет равен:

$$I = \int j dS \approx \frac{2\pi H}{\rho \ln \frac{L}{R}} U,$$

где H – глубина погружения электродов.

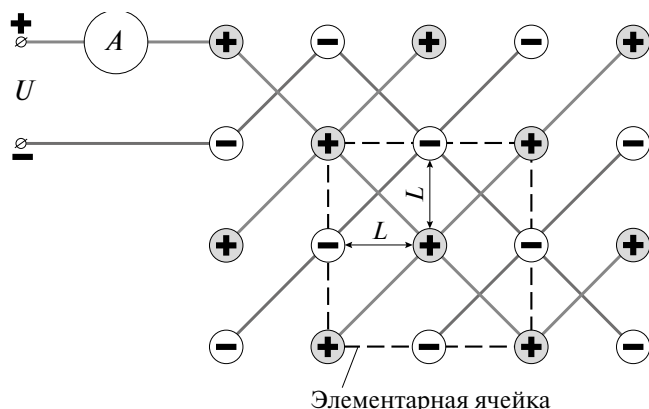


Рис. 1. Шахматная схема расположения электродов.

Суммарный ток между электродами можно рассчитать по выражению:

$$I_{sum} = \frac{\pi S H}{L^2 \rho \ln \frac{L}{R}} U,$$

где S — площадь загрязненного участка.

Величина энергопотребления составит:

$$W_{sum} = I_{sum} U_t.$$

Количество элементарных ячеек определяется соотношением $S/4L^2$, а количество анодов — $S/2L^2$.

Время проведения электрообработки можно определить по формуле:

$$t = \frac{1}{aI} \ln \left[\frac{C_0 - C_1}{C(t) - C_1} \right],$$

где $C(t)$ — концентрация нефтепродуктов в момент времени t ;

a, b — коэффициенты, зависящие от типа почвы.

Практика показывает, что в полевых условиях загрязняющие вещества чаще всего распределяются неравномерно в пределах очищаемой территории, т. е. можно выделить участки, загрязненные в большей или меньшей степени. В этом случае обеспечить одинаково эффективную очистку можно использованием отдельных источников питания для каждой зоны. Однако более экономичным и менее энергозатратным является применение единого источника питания с варьированием размеров электродов или расстояния между ними в пределах зон с определенной концентрацией поллютантов. При этом будет действовать условие:

$$\frac{R_{hp}}{R_{lp}} \approx \frac{C_{hp}}{C_{lp}},$$

где R_{hp} — радиус электродов для зоны с более высокой концентрацией поллютантов;

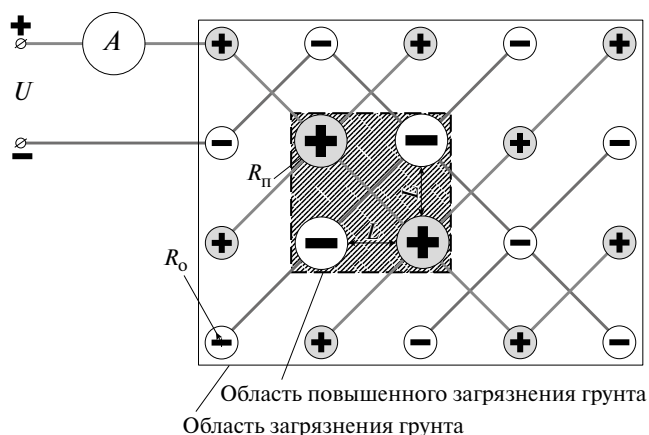


Рис. 2. Схема установки с разноразмерными электродами.

R_{lp} — радиус электродов для менее загрязненной зоны;

C_{hp} — концентрация нефтепродуктов в более загрязненной зоне;

C_{lp} — концентрация нефтепродуктов в менее загрязненной зоне.

Схема, представленная на рис. 2, предполагает использование разноразмерных электродов. При этом ток между электродами, размещенными на расстоянии l , составит:

$$I_1 = \frac{2\pi H U}{\rho \ln \frac{L}{R}}.$$

Суммарный ток между электродами на участке площадью S составит:

$$I = 2 \frac{S}{l^2} I_1.$$

Длительность очистки определенной зоны будет определяться в зависимости от начальной концентрации C нефтепродуктов и объема очищаемого грунта V :

$$t = \frac{C q_{sp} l^2 V}{4\pi S H U} \rho \ln \frac{l}{R}.$$

Тогда радиус для зоны с повышенным загрязнением составит:

$$R_{hp} = l \left(\frac{R_{lp}}{l} \right)^{C_{lp}/C_{hp}}.$$

Второй вариант энергоэффективной установки подразумевает изменение расстояния между электродами в зонах с различным уровнем загрязнения, как показано на рис. 3.

Расстояние между электродами в зонах с большим уровнем загрязнения можно определить по формуле:

$$l_1 = R \left(\frac{l}{R} \right)^{C/C_{hp}}.$$

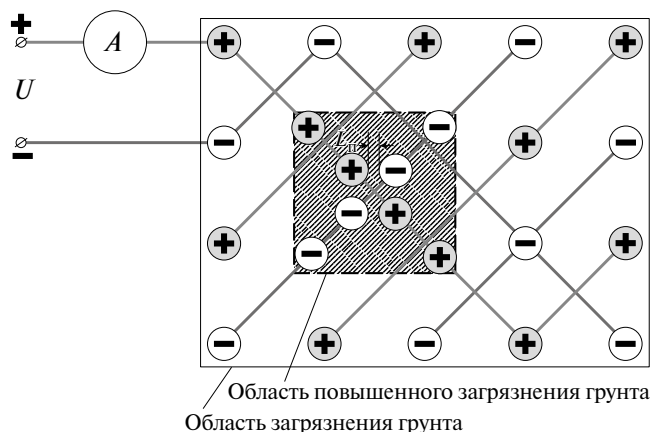


Рис. 3. Схема установки с разноудаленными электродами.

Характерным явлением при электрохимической очистке является перемещение электрофоретического потока по направлению к катоду, где, соответственно, будут скапливаться нефтепродукты. Для удаления загрязняющих веществ целесообразно использовать перфорированные металлические катоды в центре окружности из цилиндрических анодов. Это позволит контролировать направление движения потока и откачивать загрязненную жидкость из более широкой области. Конструкция подходит для местности с выраженными возвышенностями и низменностями в рельефе. Кроме того, данный вид установки при необходимости позволит производить дополнительное осушение территории.

Подобное расположение электродов создаст на загрязненном участке электрическое поле, позволяющее осуществить равномерную очистку от нефтепродуктов по всему почвенному массиву. Электрический ток между противо-

положно заряженными электродами будет определяться как:

$$I = \sum \frac{U_i S_i N_i}{\rho_i l_i},$$

где U_i – напряжение между анодами и i катодом;
 ρ_i – удельное сопротивление грунта вокруг i катода;
 N_i – число анодов вокруг i катода;

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

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

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

d_k, d_a – диаметры катода и анодов.

Время обработки, в зависимости от объема загрязненного грунта, определяется по формуле:

$$t = \frac{q_{sp} C \pi R_{ak}^2 H \rho l}{U S N}.$$

Таким образом, длительность очистки будет определяться геометрическими размерами электродов (d_k, d_a, R_{ak}) и глубиной просачивания нефтепродуктов. Сила тока I и напряжения U при заданных размерах катода и анодов устанавливаются, исходя из требуемой степени очистки и времени обработки грунта.

Комплекс из двух подобных электрохимических ячеек приведен на рис. 4. При этом обозначение K_i соответствует ситуации, когда на очищаемой местности используется одна элементарная электродная ячейка (с единственным катодом), а K_i – ситуации, когда на территории монтируется комплекс из i -го числа элементарных ячеек (с количеством катодов, равным i).

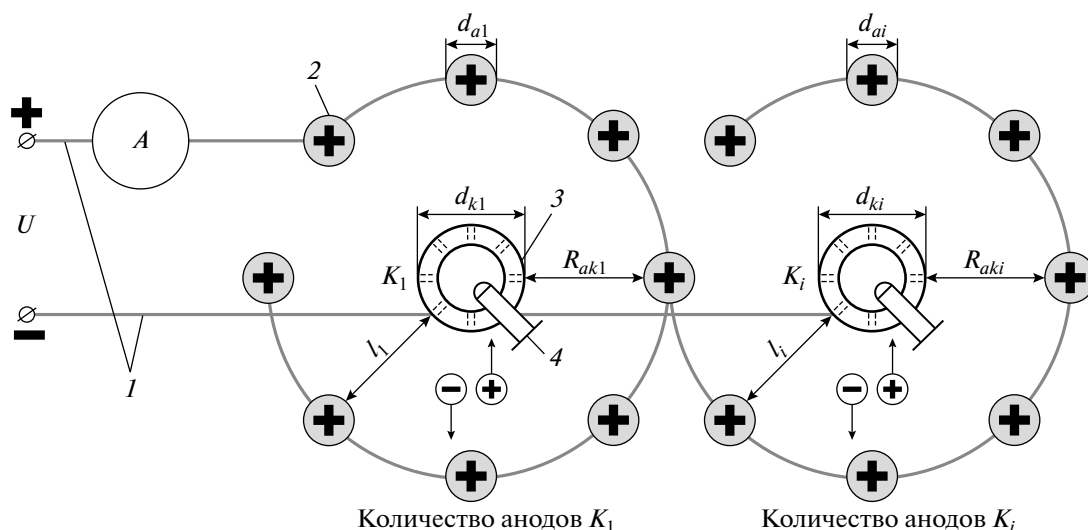


Рис. 4. Схема размещения электродов: 1 – источник питания; 2 – цилиндрические аноды; 3 – катод с перфорацией; 4 – арматура для удаления загрязненной жидкости.

Проведенные исследования показали, что для очистки одинакового по размерам и загрязнению участка грунта затраты энергии при использовании предложенной схемы значительно меньше, чем при установке катода и анода в виде пластин на границах очищаемой области.

Для создания условий, оптимальных для сбора загрязняющих веществ и удаления из околокатодной зоны, предложена модификация конструкции катода. Катод перфорируется на длину, соответствующую глубине проникновения загрязнения в грунт, а ниже труба оставляется цельной, при этом нижняя торцевая часть герметично закрывается (рис. 5).

К основным преимуществам предлагаемой конструкции устройства электрохимической очистки нефтезагрязненного грунта относятся локализация загрязненной жидкости внутри катодной трубы и более легкое вынимание ка-

тодной трубы из-за предотвращения попадания грунта в ее внутреннюю нижнюю часть.

Предусматривается, что любой из видов приведенных установок может быть оснащен системой точечного отвода и сбора газов непосредственно от электродов. Такая система является необходимостью в случае сильного загрязнения грунта нефтепродуктами и, как следствие, при опасности выделения значительного объема газообразных продуктов неполного окисления углеводородов в атмосферный воздух. В последствии газы, собранные в баллон, могут направляться на разделение или утилизацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные конструкции установок, предназначенных для обработки нефтезагрязненного грунта, позволяют обеспечивать эффективную очистку техногенно загрязненных территорий с учетом специфических особенностей рельефа местности, характера горизонтального и вертикального распространения поллютантов, обводненности среды.

Сочетание энергоэкономичности и эффективности, а также простота сборки и транспортировки элементов установок обеспечивают применимость как для очистки значительных территорий, так и для точечного удаления органических загрязнителей.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

b	безразмерный коэффициент, определяемый отношением остаточного и начального содержания нефтепродуктов в почве
C	концентрация нефтепродуктов, мг/м ³
d	диаметр электрода, м
H	глубина погружения электрода, м
i	число катодов на участке, шт.
j	плотность тока, А/м ²
l	расстояние между парой электродов при неравномерном загрязнении, м
L	расстояние между катодом и анодом, м
N	число катодов вокруг центрального анода, шт.
q	электрический заряд, Кл
r	расстояние от электрода, м
R	радиус электрода, м
S	площадь загрязненного участка, м ²
t	время проведения обработки, с
U	напряжение между электродами, В
V	объем грунта, м ³
W	энергопотребление, Дж
ρ	удельное сопротивление, Ом м

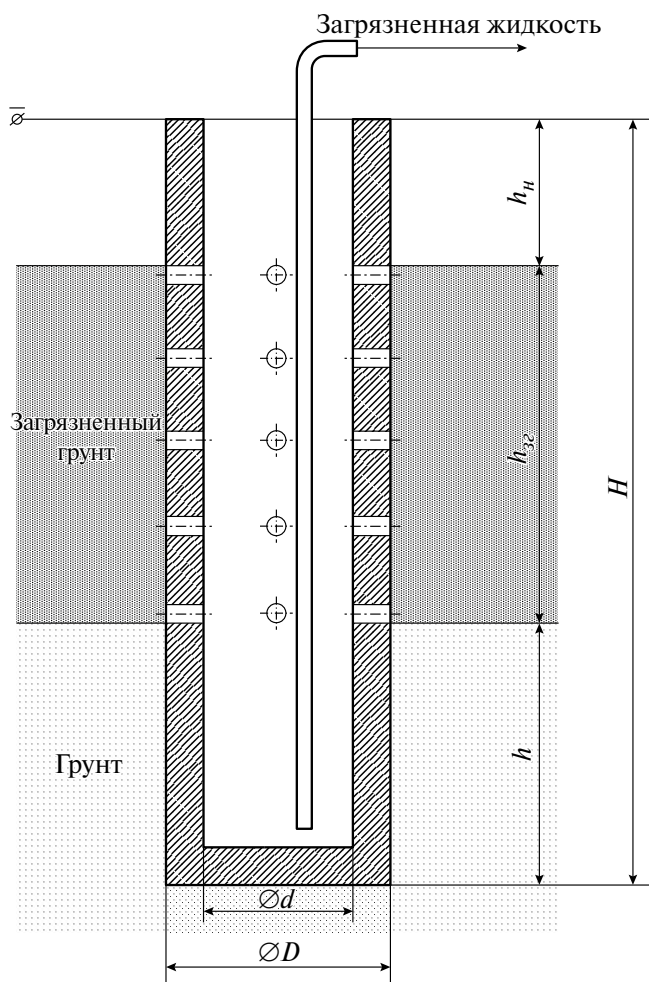


Рис. 5. Модификация катода: H — общая длина катода; h_n — длина надземной части катода; $h_{зв}$ — длина части катода, соответствующая глубине проникновения загрязняющего вещества; h — длина части катода, расположенной ниже уровня проникновения загрязняющего вещества; d — внутренний диаметр катода; D — внешний диаметр катода.

- α коэффициент, определяемый величиной предельного удельного электрического заряда, Кл⁻¹
- π число Пи

ИНДЕКСЫ

- a, k соответственно анод и катод
- hp, lp соответственно более загрязненный участок и менее загрязненный участок
- i номер электрода
- sp удельный
- sum суммарная для всей площади
- t момент времени

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022.
- Dos santos E., Saez C., Canizares P., Silva D., Martinez-Huitle C., Rodrigo M.* Treatment of ex-situ soil-washing fluids polluted with petroleum by anodic oxidation, photolysis, sonolysis and combined approaches // *Chem. Eng. J.* 2016. № 310. P. 581.
- Korolev V.A.* Electrokinetic remediation of oil-contaminated soils // *J. of Environ. Sci. and Health. Part A: Toxic / Hazardous Subst. and Environ. Eng.* 2008. № 43. P. 876.
- Asadollahfardi G., Rezaee M.* Electrokinetic remediation of diesel-contaminated silty sand under continuous and periodic voltage application // *Environm. Eng. Research.* 2019. V. 24. № 3. P. 456.
- Cocarta D.M., Istrate I.A., Streche C., Dumitru D.M.* Removal of Total Petroleum Hydrocarbons from Contaminated Soils by Electrochemical Method // *World Academy of Sci., Eng. and Technol. Int. J. of Environ. and Ecol. Eng.* 2017. V. 11. P. 469.
- 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. № 270. P. 15.
- Zheng W., Cui T., Li H.* Combined technologies for the remediation of soils contaminated by organic pollutants. A review // *Environ. Chem. Lett.* 2022. № 20. P. 2047.
- Crognale S., Cocarta D., Streche C., D'Annibale A.* Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils // *New Biotech.* 2020. № 58. P. 101.
- Yan X., Yangjie L., Chang T., Jianqiang Y.* Application of combined remediation in heavy metal polluted soil // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. № 300. P. 4.
- Mamirova A., Baubekova A., Pidlisnyuk V., Shadenova E., Djansugurova L., Jurjanz S.* Phytoremediation of Soil Contaminated by Organochlorine Pesticides and Toxic Trace Elements: Prospects and Limitations of *Paulownia tomentosa* // *Toxics.* 2022. Vol. 465. P. 2.
- Королев В.А.* Очистка грунтов от загрязнений. М.: МАИК Наука / интерпериодика, 2001.
- Романков П.Г., Фролов В.Ф.* Теплообменные процессы химической технологии. Ленинград: Химия: Ленингр. отд-ние, 1982.
- Ступин Д.Ю.* Загрязнение почв и новейшие технологии их восстановления. СПб.: Лань, 2009.
- Романков П.Г., Курочкина М.И.* Гидромеханические процессы химической технологии. Ленинград: Химия, 1974.
- Ferrarese E., Andreottola G.* Application of Electrochemical Techniques For The Remediation Of Soils Contaminated With Organic Pollutants // *Proceed. of the Annual Int. Conf. on Soils, Sediments, Water and Energy.* 2010. № 13. P. 343.
- 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. № 270. P. 2.
- 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 // *Electrochim. Acta.* 2018. № 296. P. 317.
- Романков П.Г., Раишкова Н.Б., Фролов В.Ф.* Массообменные процессы химической технологии. Ленинград: Химия, 1975.
- Мешалкин В.П., Шулаев Н.С., Пряничникова В.В.* Экспериментально-теоретический инжиниринг энергоэффективного электрохимического процесса очистки почвы от нефтяных загрязнений // Доклады РАН. 2020. Т. 491. С. 15. [*Meshalkin V.P., Shulaev N.S., Pryanichnikova V.V.* Experimental and theoretical engineering of an energy-efficient electrochemical process for cleaning soil from oil pollution // *Doklady Chemistry.* 2020. V. 491. P. 15–19.]
- 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 Conf. Series: Mat. Sci. and Eng.* 2019. № 537 P. 62.
- Шулаев Н.С., Мешалкин В.П., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р., Быковский Н.А.* Электрохимическая очистка нефтезагрязненных грунтов с учетом рельефа местности // Экол. и промышл. России. 2022. Т. 26. № 2. С. 9. [*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(2). P. 9–13.]
- Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р.* Закономерности электрохимической очистки нефтезагрязненных грунтов // Записки Горного инст. 2021. Т. 252. С. 937. Regularities of electrochemical cleaning of oil-contaminated soils [*Shulaev N.S., Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R.* *J. of Mining Inst.* 2021. V. 252 (6), P. 937–946.]