

УДК (UDC): 574.64:504.064

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2020-23-05>

О. М. КРАЙНЮКОВ¹, д-р геогр. наук, проф., **І. А. КРИВИЦЬКА¹**

¹ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 6, м. Харків, 61022, Україна

e-mail: alkraynukov@gmail.com
ivkrivitska@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5264-3118>
<https://orcid.org/0000-0003-4727-794X>

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ КАПСУЛЮВАННЯ ДІОКСИДУ КРЕМНІЮ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ НАФТОЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ

Мета. Апробація методу капсулювання діоксиду кремнію для відновлення біологічної повноцінності забрудненого нафтопродуктами ґрунту.

Методи. Інкапсулюючий розчин виготовлено з використанням силікату натрію (7% мас./об.) в якості основного компонента і синтетичної поверхнево-активної речовини (додецилсульфат натрію). Для відновлення забрудненого ґрунту використовувалося співвідношення компонентів розчину задля обробки 1:1, 1:2, 1:3 та 1:4 для силікату натрію і додецилсульфату натрію відповідно. Фітотоксичність забрудненого нафтопродуктами ґрунту визначали шляхом біотестування водних витяжок з ґрунту.

Результати. Найбільш оптимізованим для використання з досліджуваних співвідношень компонентів є розчин – 1 частина силікат натрію та 2 частини додецилсульфату натрію. Найменший фітотоксичний ефект (17%) зафіксовано при рН 5 обробленого ґрунту та співвідношенні компонентів розчину 1:2 (силікат натрію / додецилсульфат натрію). В експериментах використано 2 види однодольних (овес, кукурудза) і 2 види дводольних рослин (салат, редька чорна).

Висновки. Технологія капсулювання діоксиду кремнію при обробці нафтозабруднених ґрунтів розчином силікату натрію та додецилсульфату натрію є досить економічно привабливою. Матеріал, що утворюється в результаті процесу інкапсуляції, висихає, утворюючи аморфний кремнеземний матеріал, всередині якого, на нашу думку, акумулюються вуглеводні і важкі метали, але для такого твердження необхідні подальші дослідження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: нафтопродукти, ґрунт, вуглеводні, діоксид кремнію, інкапсуляція

Krainiukov O. M.¹, Kryvytska I. A.¹

¹V. N. Karazin Kharkiv National University
Svobody Square, 6, 61022, Kharkiv, Ukraine

USE OF SILICON DIOXIDE ENCAPSULATION METHOD FOR RESTORATION OF OIL-POLLUTED SOILS

Purpose. Aprrobation of the method of encapsulation of silicon dioxide to restore the biological value of oil-contaminated soil.

Methods. The encapsulating solution was prepared using sodium silicate (7% w. / vol.) as the main component and a synthetic surfactant (sodium dodecyl sulfate). To restore the contaminated soil, a treatment solution ratio of 1:1, 1:2, 1:3 and 1:4 was used for sodium silicate and sodium dodecyl sulfate, respectively. Phytotoxicity of oil-contaminated soil was determined by biotesting aqueous extracts from the soil.

Results. The most optimized for use from the studied ratios of substances is a solution consisting of 2 parts: sodium silicate and sodium dodecyl sulfate. The lowest phytotoxic effect (17%) was recorded at pH of 5 of the treated soil and the ratio of solution components 1:2 (sodium silicate / sodium dodecyl sulfate). In the experiments, 2 species of monocotyledons (oats, corn) and 2 species of dicotyledonous plants (lettuce, black radish) were used.

Conclusions. The technology of encapsulation of silicon dioxide in the treatment of oil-contaminated soils with a solution of sodium silicate and sodium dodecyl sulfate is quite economically attractive. The material formed as a result of the encapsulation process dries, forming an amorphous silica material, within which, in our opinion, hydrocarbons and heavy metals accumulate, but further research is needed for such a statement.

KEY WORDS: oil products, soil, hydrocarbons, silicon dioxide, encapsulation

© Крайнюков О. М., Кривицька І. А., 2020



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Крайнюков А. Н.¹, Кривицкая И. А.¹

¹Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

пл. Свободы 6, г. Харьков, 61022, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КАПСУЛИРОВАНИЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ВОСТА- НОВЛЕНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

Цель. Апробация метода капсулирования диоксида кремния для восстановления биологической полноценности загрязненного нефтепродуктами грунта.

Методы. Инкапсулирующий раствор изготовлен с использованием силиката натрия (7% масс./об.) в качестве основного компонента и синтетического поверхностно-активного вещества (додецилсульфата натрия). Для восстановления загрязненной почвы использовалось соотношение раствора для обработки 1:1, 1:2, 1:3 и 1:4 для силиката натрия и додецилсульфата натрия соответственно. Фитотоксичность загрязненного нефтепродуктами грунта определяли путем биотестирования водных вытяжек из почвы.

Результаты. Наиболее оптимизированным для использования для исследуемых соотношений веществ является раствор – 1 часть силикат натрия и 2 части додецилсульфата натрия. Наименьший фитотоксический эффект (17%) зафиксирован при pH 5 обработанного грунта и соотношении компонентов раствора 1:2 (силикат натрия/додецилсульфат натрия). В экспериментах использованы 2 вида однодольных (овес, кукуруза) и 2 вида двудольных растений (салат, редька черная).

Выводы. Технология капсулирования диоксида кремния при обработке нефтезагрязненных почв раствором силиката натрия и додецилсульфата натрия является достаточно экономически привлекательной. Материал, который образуется в результате процесса инкапсуляции, высыхает, образуя аморфный кремнеземный материал, внутри которого, по нашему мнению, аккумулируются углеводороды и тяжелые металлы, но для такого утверждения необходимы дальнейшие исследования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нефтепродукты, почва, углеводороды, диоксид кремния, инкапсуляция

Вступ

Вуглеводневе забруднення геологічно-го та суміжних з ним середовищ має свої особливості за характером впливу на геосистеми у зв'язку з тим, що нафтопродукти мають багатоконпонентний різноманітний хімічний склад. Основними характеристиками складу нафтопродуктів, які визначають їх вплив на екологічний стан території і на біотичну складову екосистем, є вміст легкої фракції циклічних вуглеводнів, твердих парафінів, смол, асфальтенів та сірки. Легка фракція нафтопродуктів – це прості низькомолекулярні метанові (алкани), нафтенові (циклопарафіни) та ароматичні вуглеводні. Метанові вуглеводні, володіючи наркотичними властивостями, чинять токсичну дію на ґрунтові і водні організми. До циклічних належать нафтенові та ароматичні вуглеводні. Загальний вміст нафтенових вуглеводнів у складі нафтопродуктів змінюється від 35 до 60 %; вміст ароматичних вуглеводнів складає від 20 до 40 %, основна маса яких належить бензолу. Ароматичні вуглеводні – найбільш токсичні компоненти. Наслідки вуглеводневого забруднення природного середовища визначаються сукупністю факторів: кількістю та хімічним складом нафтопродуктів, характером взаємодії абіотичних умов та біотичної складової екосистем. Від сукупної дії цих факторів залежить, адаптується екосистема до вуглеводневого навантаження, чи буде деградувати [1].

При вуглеводневому забрудненні території створюються техногенні міграційні потоки нафтопродуктів, основне навантаження від яких приймають ґрунти, підземні та поверхневі води.

Вплив важких металів на якість та продуктивність ґрунту добре відомий [2,3]. Негативний вплив забруднення вуглеводнями на якість ґрунту та продуктивність є глобальним викликом. Такі параметри якості ґрунту, як катіонообмінна здатність, текстура, загальний фосфор, pH, загальний азот, органічний вуглець та вміст органічної речовини часто суттєво впливають на наявність вуглеводнів у ґрунті [4-6].

Завдяки стійкості вуглеводнів та важких металів у ґрунтах, вони перешкоджають росту рослин, впливають на продуктивність сільськогосподарських угідь. Тому для екологічної безпеки важливо застосовувати превентивні заходи та застосовувати підходи проти надмірного впливу таким чином, щоб захистити та відновити ґрунт для продуктивного використання навіть у випадках аварійного розливу вуглеводнів.

Різні методи використовувались не лише для відновлення забруднених вуглеводнями ґрунтів, але і для видалення важких металів із ґрунту. Деякі із таких методів видалення вуглеводнів включають біоремедіаційний підхід шляхом біостимуляції двоступеневої системи компостування у резервуа-

рах [7], біодеградацію нафтового мулу за допомогою нової двофазної системи компостування [8], хімічне окислення з подальшим компостуванням донного мулу в резервуарах [9], обробку поверхнево-активними речовинами, які посилюють санацію забруднених підземних вод вуглеводнями [10]. З іншого боку, деякі відомі методи видалення металів включають метод осадження з використанням лугу, отриманого із зелених відходів [11], вилучення важких металів із ґрунту за допомогою етилендіамінтетраоцтової та нітрило-триоцтової кислот [12]. Незважаючи на успішність вирішення проблеми у цих підходах, важливо дослідити методи, які одночасно вирішуватимуть як проблему вуглеводневого забруднення, так і надлишкового вмісту важких металів у ґрунті. Тому тривають дослідження з метою пошуку найбільш ефективної, екологічно чистої та економічно вигідної технології відновлення, яка одноча-

сно вирішить проблему забруднення ґрунтів вуглеводнями та важкими металами. Незважаючи на те, що очищення забруднених вуглеводнями територій, було широко досліджено з використанням декількох підходів із використання біоремедиації [4-11] та інших хімічних сполук та реагентів [13], технічні недоліки та відсутність екологічної сумісності вимагає подальших досліджень альтернативних варіантів санації, позбавлених існуючих недоліків.

Це вимагає дослідження технології капсулювання діоксиду кремнію, яка як очікується, буде економічно вигідною, екологічно чистою і легкою при практичному застосуванні.

Мета роботи – апробація методу капсулювання діоксиду кремнію для відновлення біологічної повноцінності забрудненого нафтопродуктами ґрунту.

Методи дослідження

Моделювання забруднення ґрунту нафтопродуктами (15%) було досягнуто шляхом ретельного змішування 150 г сирової нафти з 1 кг ґрунту. Змодельований ґрунт залишали на ніч для забезпечення належного змішування вуглеводнів із ґрунтовою матрицею. Для забруднення було використано нафту Бугроватівського родовища (Охтирський район Сумської обл.), ґрунт - чорнозем опідзолений важкосуглинковий на лесі.

Для дослідження процесу інкапсуляції було використано наступні реагенти - силікат натрію (Na_2SiO_3) і додецилсульфат натрію ($\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$), які було використано для відновлення біологічної повноцінності нафтозабруднених ґрунтів. Фітотоксичність забрудненого нафтопродуктами ґрунту ви-

значали шляхом біотестування водних вищих з ґрунту. Для визначення фітотоксичності ґрунту було використано рекомендований міжнародним стандартом набір рослин [14,15]. В експериментах було використано 2 види однодольних (овес, кукурудза) і 2 види дводольних рослин (салат, редька чорна), які мали найбільш ранню схожість та найменший період вегетації. Основними показниками згідно з [16], за якими проводили оцінку фітотоксичності ґрунтів, були: кількість пророслих рослин, довжина коренів та паростків. Враховували вірогідність відхилення значень цих критеріїв від контролю. Фітотоксичними вважались ґрунти, за результатами біотестування яких значення будь-якого з перелічених критеріїв вірогідно відрізнялось від контролю.

Результати та обговорення

Інкапсулюючий розчин було виготовлено з використанням силікату натрію (7% мас./об.) в якості основного компонента і синтетичної поверхнево-активної речовини (додецилсульфат натрію). Для відновлення забрудненого ґрунту використовувалося співвідношення розчину задля обробки 1:1, 1:2, 1:3 та 1:4 для силікату натрію і додецилсульфату натрію відповідно, 1 дм^3 розчину силікату натрію (500 см^3) і додецилсульфат натрію (500 см^3) було виготовлено разом в

змішаному обсязі. Це було зроблено шляхом створення оптимізованої концентрації силікату натрію 7% мас./об. і 7% мас./об. додецилсульфату натрію для забезпечення співвідношення 1:1 в обсязі 1 дм^3 . Інші концентрації було виготовлено аналогічним чином з урахуванням відповідних масових часток компонентів, розчини залишали відстоюватися для рівномірного розчинення і гомогенізації на одну добу. Вибір поверхнево-активної речовини був заснований на

його здатності до біологічного розкладання і аніонної природи. Силікатний розчин певної концентрації (1 л) вносили до 1 кг ґрунту, забрудненого сировою нафтою шляхом виливання і перемішування мішалкою. Всі зразки протягом 7 діб було витримано у

термоліюмностаті при 25°C, експеримент мав трикратну повторюваність.

Дані біотестування, отримані після обробки ґрунту, забрудненого сировою нафтою з використанням технології капсулювання кремнезема наведено нижче.

Таблиця

Результати визначення фітотоксичних властивостей ґрунтів (усереднені після 3 серій)

№	Зразки	Співвідношення обробки силікат натрію / додецилсульфат натрію	Рівні пригнічення ростових процесів (фітотоксичний ефект), %	Рівень забрудненості ґрунтів
1.	Ґрунт, забруднений сировою нафтою	-	83	дуже брудні
2.	Ґрунт, забруднений сировою нафтою та оброблений інкапсулюючим розчином	1:1	35	слабко забруднені
3.	Ґрунт, забруднений сировою нафтою та оброблений інкапсулюючим розчином (1:2)	1:2	17	незабруднені
4.	Ґрунт, забруднений сировою нафтою та оброблений інкапсулюючим розчином (1:3)	1:3	31	слабко забруднені
5.	Ґрунт, забруднений сировою нафтою та оброблений інкапсулюючим розчином (1:4)	1:4	42	помірно забруднені

Як видно з наведених результатів, найбільш оптимізованим для використання з досліджуваних співвідношень речовин є розчин – 1 частка силікат натрію та 2 частки додецилсульфату натрію.

Матеріал, що утворюється в результаті процесу інкапсуляції, висихає, утворюючи аморфний кремнеземний матеріал, всередині якого знаходяться інкапсульовані вуглеводні, та і як ми вважаємо, інші забруднюючі речовини (важкі метали та ін.).

В процесі проведення досліджень проаналізовано вплив рН забрудненого ґрунту та співвідношення компонентів інкапсулюючого розчину на фітотоксичний ефект (рис.). Водневий показник (рН) забрудненого ґрунту

дорівнював до обробки 4,7, а під час експерименту штучно варувався від 3 до 9 одиниць задля визначення оптимального значення рН при проведенні обробки інкапсулюючим розчином.

Найменший фітотоксичний ефект (17%) було зафіксовано при рН 5 обробленого ґрунту та співвідношенні компонентів розчину 1:2 (силікат натрію / додецилсульфат натрію). Оптимальне значення рН 5 знаходиться в тому ж діапазоні, що і значення рН забрудненого ґрунту, яке становить 4,7. Отже, при обробці ґрунту не виникає потреба у коректуванні рН.

Значення рН 5 узгоджується з дослідженнями [13], де повідомлялося, що інкап-

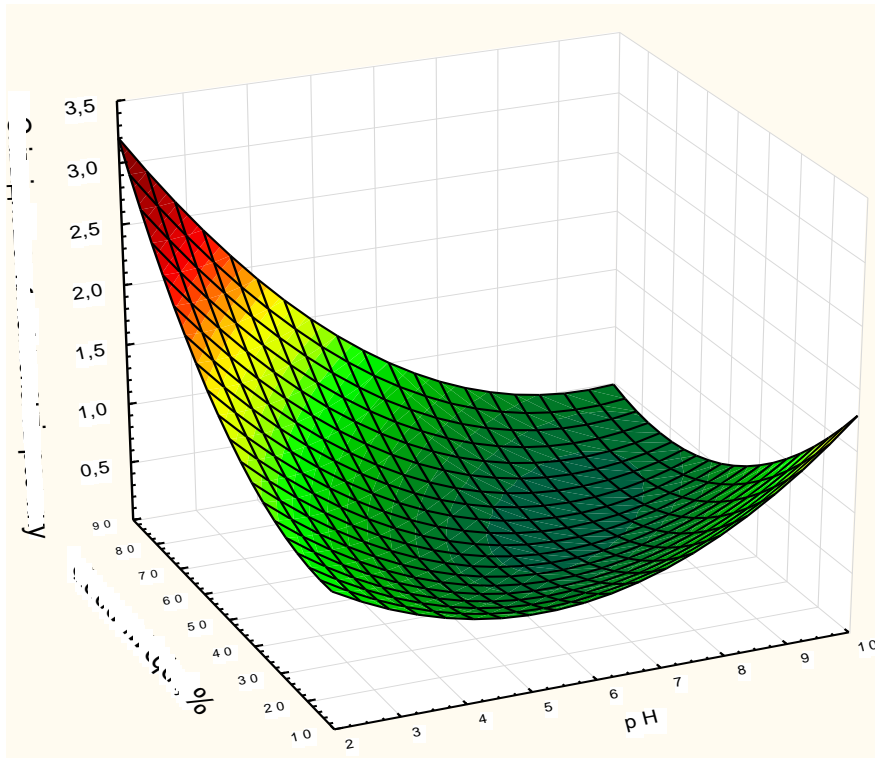


Рис. – Вплив рН забрудненого ґрунту та співвідношення компонентів інкапсулюючого розчину на фітотоксичний ефект

суляція вуглеводнів і металів діоксидом кремнію більш ефективна в діапазоні низьких кислотних значень рН (4-5). Діоксид кремнію не розчиняється в кислому діапазоні рН, що дозволяє йому випадати в осад при такому рН, що забезпечує ефективну інкапсуляцію забруднювача на відміну від лужних розчинів, де він стабільний.

Це підтверджує важливість використання поверхнево-активної речовини додецилсульфату натрію в якості агенту, який сприяє затвердженню та інкапсуляції вуглеводнів, оскільки він забезпечує кисле середовище для осадження діоксиду кремнію з розчину силікату натрію [17].

Висновки

Встановлено оптимальне співвідношення інкапсулюючого розчину силікату натрію та додецилсульфату (1:2), застосування якого знижує фітотоксичний ефект від нафтового забруднення ґрунтів із 82% до 17%. Оптимальним значенням рН ґрунту (5) в процесі капсулювання діоксиду кремнію є кисле середовище.

Технологія капсулювання діоксиду кремнію при обробці нафтозабруднених

Знижена кислотність корисна також для сільськогосподарських ґрунтів, оскільки вона впливає на доступність основних мінеральних елементів в ґрунті для поглинання і росту рослин.

Інкапсульовані вуглеводні не вилугуються і не вивільнюються при подрібненні аморфного кремнеземного матеріалу. Внаслідок цього отриманий висушений аморфний кремнеземний матеріал може бути видалений з обробленої поверхні ґрунту шляхом механічної мийки та чищення, або внаслідок випадіння природних дощів чи відшаровування під впливом погодних умов без подальшого втручання, залишаючи очищеною поверхню ґрунту.

ґрунтів розчином силікату натрію та додецилсульфату натрію є досить економічно привабливою, якщо в результаті подальших досліджень буде підтверджена здатність цього розчину видаляти забруднюючі речовини з ґрунту. Ця технологія більш ефективна в порівнянні з біоремедіацією і іншими методами, тому що вартість інкапсулюючих матеріалів досить низька і для відновлення великого об'єму забрудненого ґрунту потрібен відносно невеликий об'єм

компонентів, які будуть сприяти відновленню нафтозабруднених ґрунтів.

Матеріал, що утворюється в результаті процесу інкапсуляції, висихає, утворюючи

аморфний кремнеземний матеріал, всередині якого, на нашу думку, акумулюються вуглеводні і важкі метали, але для такого твердження необхідні подальші дослідження.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Література

1. Пиковский Ю. И. Геохимические особенности техногенных потоков в районах нефтедобычи. *Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем*. М.: Наука, 1981. 135 – 148.
2. Крайнюков О. М. Оцінка екологічної небезпеки забруднення нафтопродуктами ґрунтового покриву. *Захист довкілля від антропогенного навантаження*. 2007. №14(16). С. 210-219.
3. Edema N. E., Asagba S. O. Influence of nutrient supplementation on crude oil induced toxicity in Okra (*Abelmoschus esculentus*). *Nigerian Journal of Science and Environment*, 2007. Vol. 6. P. 58-66.
4. Akpoveta V. O., Egharevba F., Medjor O. W. A pilot study on the biodegradation of hydrocarbon and its kinetics on kerosene simulated soil *Int. J. Environ. Sci.*, 2011, Vol. 2. No 1. P. 54-67. URL: <http://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijes&volume=2&issue=1&article=005>
5. Akpoveta V. O., Egharevba F., Medjor O. W., Ize-Iyamu Microbial degradation and its kinetics on crude oil polluted soil *Res. J. Chem. Sci.*, 2011. Vol. 1. No 6. P. 2231-2606. URL: https://www.researchgate.net/profile/Akpoveta_Vincent/publication/288255562_Surfactant_enhanced_soil_wash-ing_technique_and_its_kinetics_on_the_remediation_of_crude_oil_contaminated_soil/links/573592d308ae9ace840aaa70/Surfactant-enhanced-soil-washing-technique-and-its-kinetics-on-the-remediation-of-crude-oil-contaminated-soil.pdf
6. Akpoveta V. O. Fenton oxidative mechanism and its kinetics on the remediation of soil contaminated with unrefined petroleum oil. *J. Chem. Soc. Niger.*, 2016. Vol. 41. No 2. P. 54-61. URL: <http://journals.chemsociety.org.ng/index.php/jcsn/article/view/71>
7. Koolivand A., Rajaei M. S., Ghanadzadeh M. J. , Saeedi R. Bioremediation of storage tank bottom sludge by using a two-stage composting system: effect of mixing ratio and nutrients addition. *Biores. Technol.*, 2017, Vol. 235. P. 240-249. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417303814>
8. Koolivand A., Godini K., Saeedi R., Abtahi H., Ghamari F. Oily sludge biodegradation using a new two-phase composting method: kinetics studies and effect of aeration rate and mode. *Process Biochem.*, 2018. Vol. 79. P. 127-134. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359511318314144>
9. Koolivand A., Naddafi K., Nabizadeh R., Saeedi R. Optimization of combined in-vessel composting process and chemical oxidation for remediation of bottom sludge of crude oil storage tanks. *Environ. Technol.*, 2018. Vol. 39. No 20. P. 1-18. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2017.1362037>
10. Medjor O. W., Akpoveta O. V., Egharevba F. Kinetics and physicochemical studies of surfactant enhanced remediation of hydrocarbons contaminated groundwater. *Egypt. J. Petrol.*, 2018. Vol. 27. P. 169-176. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2017.1362037>
11. Akpoveta O.V. Kinetics of the treatment of heavy metals contaminated soils using locally sourced ash as a remediation technique. *Chemtec journal*. 2016. Vol. 11. P. 188-204. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110062116302604>
12. Naghipour D., Jaafari J., Ashrafi S. D., Mahvi A. H. Remediation of heavy metals contaminated silty clay loam soil by column extraction with ethylenediaminetetraacetic acid and nitrilo triacetic acid. *J. Environ. Eng.*, 2017. Vol. 143. No 8. P. 1-8. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343716302846>
13. Medjor O. W., Namessan O.N., Medjor E. A. Optimization, kinetics, physicochemical and ecotoxicity studies of Fenton oxidative remediation of hydrocarbons contaminated groundwater. *Egypt. J. Petrol.*, 2018. Vol. 27. P. 227-233. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110062117300387>
14. ISO 11269-1:2012 Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 1. Method for the measurement of inhibition of root growth. URL: <https://www.iso.org/standard/51388.html>
15. ISO 11269-2:2005 Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 2. Effects of chemicals on the emergence and growth of higher plants. URL: <https://www.iso.org/standard/36425.html>
16. Крайнюков О. М., Кривицька І. А. Спосіб визначення ступеня забрудненості ґрунтів: пат. 113560 Україна: МПК G01N 33/24 u201605283; ; заявл. 16.05.2016; опубл. 10.02.2017. Бюл. № 3. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=232025>

17. Mbhele P.P. Remediation of Soil and Water Contaminated by Heavy Metals and Hydrocarbons using Silica Encapsulation. Unpublished Masters thesis. Department of Chemistry, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 2007, P. 54-61. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Remediation-of-soil-and-water-contaminated-by-heavy-Mbhele/fabbc50b78973f77c4bfb5741a57306a551ab0a4?p2df>

References

1. Pikovskiy, Yu. (1981). Geochemical features of technogenic flows in oil production areas // *Technogenic flows of matter in landscapes and the state of ecosystems*. Moscow: Nauka, 135. 148. (in Russian)
2. Krainyukov, O. (2007). Assessment of the ecological danger of soil pollution by oil products. *Protection of the Environment from Anthropogenic Load*, (14-16), 210-219. (in Ukrainian)
3. Edema, N.E. & Asagba, S.O. (2007). Influence of nutrient supplementation on crude oil induced toxicity in Okra (*Abelmoschus esculentus*). *Nigerian Journal of Science and Environment*, 6, 58-66.
4. Akpoveta, V.O., Egharevba, F. & Medjor, W.O. (2011). A pilot study on the biodegradation of hydrocarbon and its kinetics on kerosene simulated soil. *Int. J. Environ. Sci.*, 2 (1), 54-67. Retrieved from <http://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijes&volume=2&issue=1&article=005>
5. Akpoveta, V.O., Egharevba, F. & Medjor, O.W., (2011). Ize-Iyamu Microbial degradation and its kinetics on crude oil polluted soil. *Res. J. Chem. Sci.*, 1 (6), 2231-2606. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Akpoveta_Vincent/publication/288255562_Surfactant_enhanced_soil_washing_technique_and_its_kinetics_on_the_remediation_of_crude_oil_contaminated_soil/links/573592d308ae9ace840aaa70/Surfactant-enhanced-soil-washing-technique-and-its-kinetics-on-the-remediation-of-crude-oil-contaminated-soil.pdf
6. Akpoveta, V.O. (2016). Fenton oxidative mechanism and its kinetics on the remediation of soil contaminated with unrefined petroleum oil *J. Chem. Soc. Niger.*, 41 (2), 54-61. Retrieved from <http://journals.chemsociety.org.ng/index.php/jcsn/article/view/71>
7. Koolivand, A., Rajaei, M.S., Ghanadzadeh, M.J. & Saeedi, R. (2017). Bioremediation of storage tank bottom sludge by using a two-stage composting system: effect of mixing ratio and nutrients addition *Biores. Technol.*, 235, 240-249. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417303814>
8. Koolivand, A., Godini, K., Saeedi, R., Abtahi, H. & Ghamari, F. (2018). Oily sludge biodegradation using a new two-phase composting method: kinetics studies and effect of aeration rate and mode. *Process Biochem.*, 79, 127-134. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359511318314144>
9. Koolivand, A., Naddafi, K., Nabizadeh, R., Saeedi, R. (2018). Optimization of combined in-vessel composting process and chemical oxidation for remediation of bottom sludge of crude oil storage tanks *Environ. Technol.*, 39 (20), 1-18. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2017.1362037>
10. Medjor, O.W., Akpoveta, O.V., Egharevba, F. (2018). Kinetics and physicochemical studies of surfactant enhanced remediation of hydrocarbons contaminated groundwater *Egypt. J. Petrol.*, 27, 169-176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.02.005>
11. Akpoveta, O.V. (2016). Kinetics of the treatment of heavy metals contaminated soils using locally sourced ash as a remediation technique. *Chemtec journal*, 11, 188-204. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110062116302604>
12. Naghipour, D., Jaafari, J., Ashrafi, S.D., Mahvi, A.H. (2017). Remediation of heavy metals contaminated silty clay loam soil by column extraction with ethylenediaminetetraacetic acid and nitrilo triacetic acid *J. Environ. Eng.*, 143 (8), 1-8. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343716302846>
13. Medjor, W.O., Namessan, O.N., Medjor, E.A. (2018). Optimization, kinetics, physicochemical and ecotoxicity studies of Fenton oxidative remediation of hydrocarbons contaminated groundwater *Egypt. J. Petrol.*, 27, 227-233. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110062117300387>
14. ISO 11269-1:2012 Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 1. Method for the measurement of inhibition of root growth. (2012). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/51388.html>
15. ISO 11269-2:2005 Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora. Part 2. Effects of chemicals on the emergence and growth of higher plants. (2005). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/36425.html>
16. Krainyukov, O., Kryvytska, I. (2017). Method of determining the degree of soil contamination. Patent of Ukraine for useful model. G01N 33/24 (2006.01). № 113560; declared 16.05.2016; published 10.02.2017, Bulletin, (3). Retrieved from <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=232025> (In Ukrainian).
17. Mbhele, P.P. (2007). Remediation of Soil and Water Contaminated by Heavy Metals and Hydrocarbons using Silica Encapsulation. (Masters thesis). *Department of Chemistry, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa*. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/Remediation-of-soil-and-water-contaminated-by-heavy-Mbhele/fabbc50b78973f77c4bfb5741a57306a551ab0a4?p2df>

Надійшла: 30.09.2020

Прийнята: 20.10.2020