

УДК 504.064:550.837.3:550.84.02

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ЭЛЕКТРООБРАБОТКЕ ГРУНТОВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ
НЕФТЕПРОДУКТАМИ**

Бушуев А.А., аспирант гр. СМа-241, II курс
Шабанов Е.А., к.т.н., доцент, зав. кафедрой СПиЭН
Научный руководитель: Простов С.М., д.т.н., профессор
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Нефтезагрязнения выступают фактором трансформации экосистем, оказывая пагубное воздействие на их биологическую составляющую [1, 2]. Углеводороды относятся к числу наиболее опасных загрязнителей, вызывающих деградацию природной среды. Попадая в почву, нефть и нефтепродукты ухудшают ее агрофизические свойства, снижают воздухопроницаемость и вызывают угнетение почвенной микрофлоры. Животный организм испытывает на себе как прямое токсическое действие компонентов нефти, так и косвенное – через потребление загрязненных кормов и воды, что ведет к нарушениям функций органов, сокращению численности популяций и обеднению видового состава [3]. Ухудшение состояния окружающей среды требует своевременного обнаружения, изучения и локализации зон загрязнения перед проведением дезактивационных работ [4].

Основные группы загрязняющих веществ из нефтепродуктов разделяются на: различные виды топлива (бензин, дизельное и реактивное топливо), смазочные материалы (масла и консистентные смазки), дорожные и строительные вяжущие (битум, гудрон, нефтяной кокс), нефтехимическое сырье, органические растворители и функциональные добавки к топливам [5-7]. Для идентификации состава, количественной оценки и отслеживания миграции экотоксикантов в грунтовой массе в отечественной и зарубежной практике применяется комплекс методов, объединяющих геологические, биологические и химические подходы [8, 9]. Несмотря на высокую эффективность перечисленных методов, их применение сопряжено с рядом существенных ограничений, среди которых: необходимость использования дорогостоящего оборудования, привлечение высококвалифицированного персонала, значительные временные затраты на выполнение лабораторных и полевых исследований, а также потребность в регулярной калибровке аппаратуры.

Для оперативного мониторинга загрязнения грунтовой массы перспективен электрофизический метод, разрабатываемый в КузГТУ на протяжении последних лет [10, 11].

Основное внимание в исследовании уделено анализу закономерностей, которым подчиняются пространственно-временные вариации физических

свойств загрязненных нефтепродуктами песчано-глинистых грунтов, и изучению взаимосвязей этих свойств в ходе их электрообработки.

Методика исследования. В качестве основы эксперимента выступала двухэлектродная система (рис. 1). Непрерывную регистрацию физических параметров грунта на глубине 18 см вели с помощью 24 датчиков, что давало возможность отслеживать процессы в реальном времени.

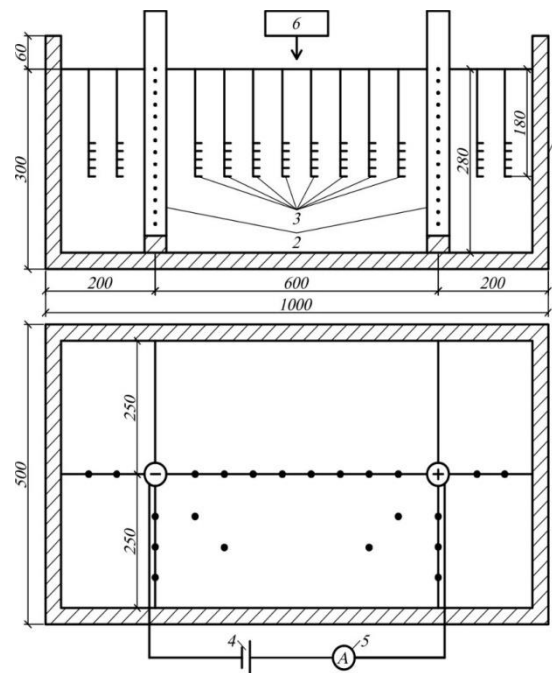


Рисунок 1 – Схема объемной модели для электрообработки загрязненного грунта:

- 1 – герметичный текстолитовый контейнер; 2 – инъекторные электроды;
3 – четырехэлектродные микрозонды; 4 – источник постоянного напряжения;
5 – амперметр-мультиметр; 6 – измеритель сопротивления с компьютерным интерфейсом

Результаты исследования. Микрозонды располагались по радиальной схеме относительно оси электродов-инъекторов, а также вдоль основной оси в межэлектродном пространстве (см. рис. 1).

Анализ круговых диаграмм удельного электрического сопротивления (УЭС), полученных при обработке незагрязненного грунта (рис. 2), выявил существенную неоднородность физических процессов в анодной и катодной областях, что обусловлено значительным искажением силовых линий электрического поля.

При обработке экспериментальных данных особое внимание уделялось измерениям вдоль прямой, соединяющей электроды. В этой области силовые линии напряженности E практически параллельны, что создает условия, близкие к однородному полю. Графики изменения относительного УЭС ρ/ρ_0 по окончании электрообработки чистого и загрязненного грунта представлены на рис. 3.

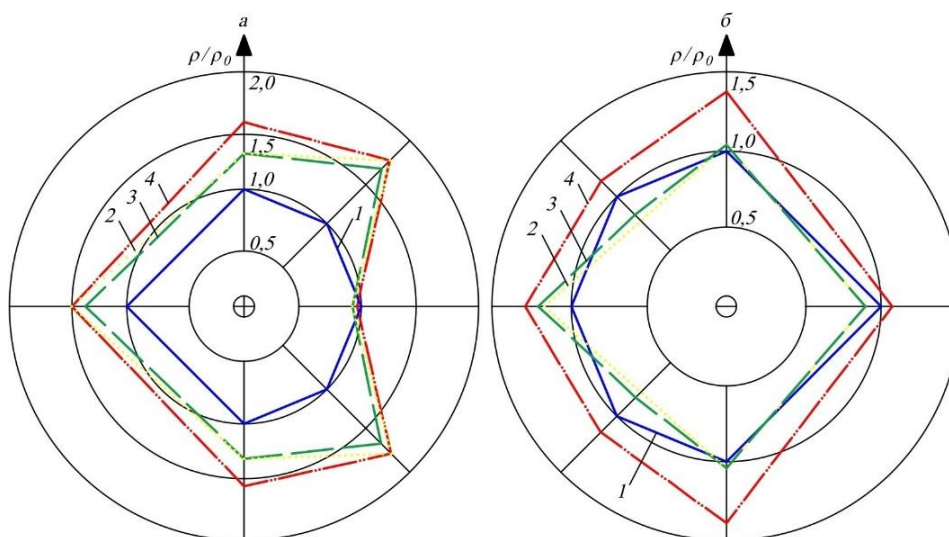


Рисунок 2 – Динамика изменения относительного УЭС ρ/ρ_0 в анодной (а) и катодной (б) зонах чистого грунта в зависимости от количества прошедшего электричества: 1 – 0 А·ч; 2 – 21 А·ч; 3 – 30 А·ч; 4 – 65 А·ч

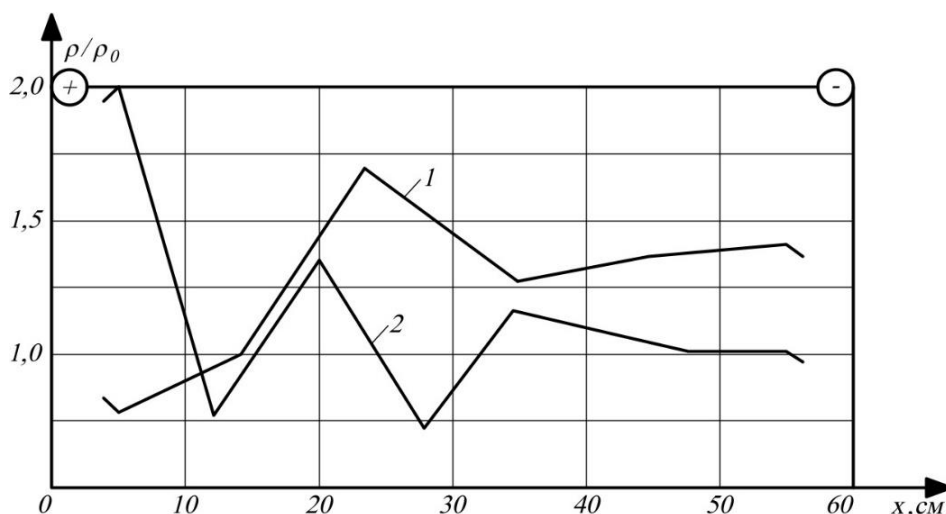


Рисунок 3 – Распределение относительного УЭС ρ/ρ_0 между электродами:
1 – чистый грунт; 2 – загрязненный грунт

Анализ полученных графиков показывает, что при воздействии током на оба типа грунта в межэлектродном пространстве выделяются три сопоставимые по ширине зоны:

- анодная область – под влиянием электрического поля инициируется электроосмотический вынос порового флюида вместе с взвешенными частицами загрязнителя по направлению к катоду;
- катодная область – участок, где концентрируется перемещенная жидкость, претерпевшая изменения в ходе миграции;
- переходная зона – интервал, в котором фиксируется плавная трансформация характеристик порового раствора.

В случае чистого грунта динамика параметров в переходной зоне носит сравнительно равномерный характер. Присутствие же нефтяных компонентов в поровой влаге вызывает волнообразные флуктуации УЭС, что обусловлено значительно более высокой вязкостью углеводородов по сравнению с природными водными растворами. Неоднородность УЭС в этой зоне определяется доминированием в составе порового заполнителя либо высокопроводящей, либо низкопроводящей фазы. Для более глубокого понимания процессов, протекающих в каждой из обозначенных зон, был осуществлен отбор проб грунта и проведен комплекс лабораторных исследований, включавший определение влажности, плотности и гранулометрического состава. Результаты, представленные в табл. 1 и 2, приведены в виде отношений конечных показателей к исходным.

Таблица 1

Отношения конечных физических параметров к значениям до обработки			
Зона модели	Влажность	Плотность в естественном состоянии	Плотность в высушенном состоянии
Чистый грунт			
Анодная	0,796	0,933	0,983
Центральная	0,855	0,944	0,977
Катодная	0,841	0,939	0,981
Грунт, загрязненный нефтепродуктом			
Анодная	0,739	0,908	0,978
Центральная	0,794	0,899	0,978
Катодная	0,731	0,910	0,983

Таблица 2

Отношения конечных значений содержания фракций грунта к начальным

Зона модели	Фракция, мм				
	2	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Чистый грунт					
Анодная	1,264	1,081	0,857	0,989	0,849
Центральная	1,114	1,024	0,926	1,179	0,797
Катодная	1,079	1,117	0,897	1,146	0,736
Грунт, загрязненный нефтепродуктом					
Анодная	0,920	1,255	0,903	1,625	0,241
Центральная	0,829	1,147	0,913	1,364	0,566
Катодная	0,977	1,312	0,829	1,292	0,396

Данные табл. 1 свидетельствуют о повсеместном снижении влажности в исследуемом объеме на 15-20 % вследствие испарения, наиболее интенсивного в приэлектродных зонах, где максимальная плотность тока j обуславливает

прогрев грунта до 40-50 °С. Плотность грунта уменьшается незначительно: на 5-10 % для незагрязненного образца и на 1,5-2 % при наличии нефтепродукта.

Существенно более выраженные изменения зафиксированы в гранулометрическом составе загрязненного грунта, особенно в фракции < 0,1 мм. Если в чистом грунте доля этой фракции сокращалась на 15-25 %, то в присутствии нефтепродукта ее уменьшение достигало 2-кратного в центральной зоне и 2,5-4-кратного в приэлектродных областях. Одновременно наблюдалось значительное увеличение содержания частиц размером 0,1-0,5 мм.

Под действием нагрева машинное масло, выступающее в роли загрязнителя, претерпевает фазовый переход (отвердевает), что инициирует агрегацию тонкодисперсных грунтовых частиц и их трансформацию в более крупные структурные элементы.

Из временных зависимостей относительного УЭС ρ/ρ_0 в приэлектродных зонах (рис. 4) видно, что для незагрязненного грунта характерны следующие закономерности:

- в катодной области электроосмотический вынос жидкости превалирует над испарением, что вызывает увеличение УЭС;
- в анодной области доминирующим процессом выступает приток порового раствора, также сопровождающийся ростом УЭС.

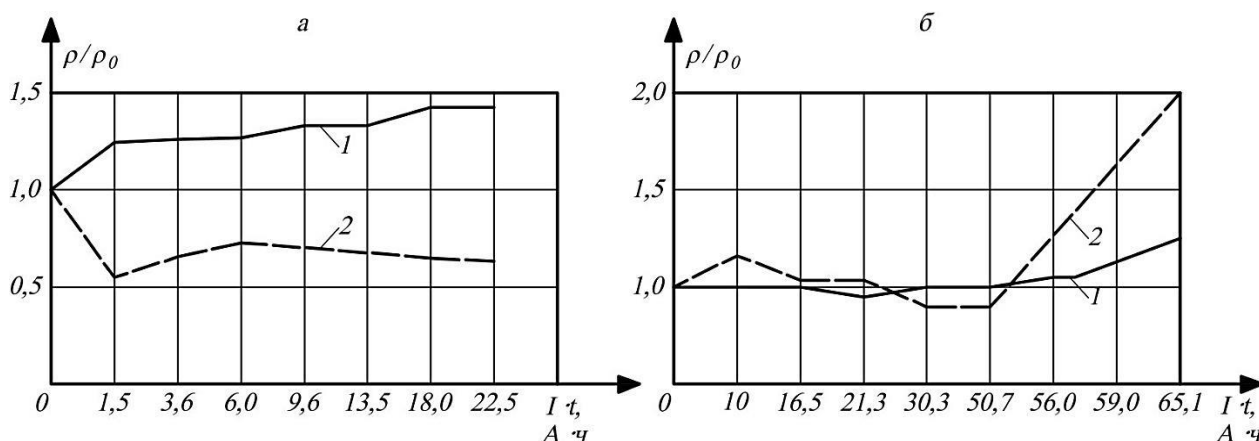


Рисунок 4 – Изменение относительного УЭС ρ/ρ_0 чистого (а) и загрязненного (б) грунта в зависимости от количества прошедшего электричества:
1 – катодная область; 2 – анодная область

Согласно графикам на рис. 4б, процесс коалесценции нефтепродукта, ведущий к укрупнению мельчайших частиц, запускается в обеих приэлектродных зонах.

По завершении эксперимента проведена послойная разборка обработанного грунта с визуальной оценкой:

- в катодной части массива грунт остается рыхлым, малопрочным, его цвет идентичен исходному суглинку;
- в анодной части фиксируется уплотнение грунта, содержащего темно-серые нерастворимые углистые образования.

При дополнительном введении в анодный электрод-инжектор активной жидкости (н-Гексан) установлено снижение вязкости нефтепродукта за счет взаимодействия с растворителем [12], что приводит к ускорению электроосмотического переноса жидкости в направлении от катода к аноду, при этом в анодной области замедляются коагуляция нефтяной фазы и уплотнение грунта.

Выводы.

1. При электрообработке нефтезагрязненных грунтов токами высокой плотности определяющее значение для эффективности дезактивации имеют два основных механизма:

– миграция порового раствора с токсикантами под действием электроосмоса от анода к катоду, облегчающая их последующее механическое удаление;

– инициируемый нагревом фазовый переход нефтепродукта из жидкой формы в твердую, которая представляет меньшую экологическую угрозу.

2. Установлена зависимость интенсивности указанных процессов от параметров (протяженности и величины) положительных аномалий УЭС, что позволяет использовать непрерывные геофизические измерения для оперативного контроля очистки грунта от нефтезагрязнений.

Список литературы:

1. Королев В. А. Очистка грунтов от загрязнений / Королев В. А.; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Геол. фак. – Москва: Наука / Интерпериодика, 2001. 364 с.

2. Zhuang J., Zhang R., Zeng Y., Dai T., Ye Z., Gao Q., Yang Y., Guo X., Li G., Zhou J. Petroleum pollution changes microbial diversity and network complexity of soil profile in an oil refinery // *Frontiers in Microbiology*. 2023. Vol. 14. P. 1193189. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1193189.

3. Махотлова М. Ш. Влияние нефтяных загрязнений на окружающую среду / М. Ш. Махотлова, З. М. Темботов // *Международный научно-исследовательский журнал*. – Екатеринбург. – 2016. – №3-2. – С. 105-107.

4. Bigliardi A.P., Fernandes C.L.F., Pinto E.A. Blood markers among residents from a coal mining area // *Environmental Science Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28 (2). – P. 1409–1416.

5. Васильченко А. В., Воеводина Т. С. Проблема экологической оценки загрязнения почв нефтепродуктами / Васильченко А. В., Воеводина Т. С. // *Вестник Оренбургского государственного университета*. – 2015. – № 10. – С. 147-151.

6. Иванова М. А., Чикина Н. С., Зенитова Л. А. Ликвидация нефтяных загрязнений // *Бутлеровские сообщения*. 2012. – Т.29. – № 3. – С. 1-12.

7. Freeze R. A., 2000, *The Environmental Pendulum: A Quest for the Truth about Toxic Chemicals, Human Health, and Environmental Protection*: University of California Press, Berkeley, CA, 323 p.

8. Committee on source removal of contaminants in the subsurface, 2005, Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and Remediation: The National Academies Press, Washington, DC, 358 p. ISBN 978-0-309-09447-4. DOI: 10.17226/11146.

9. Ступакова Г. А., Игнатьева Е. Э., Лапушкина А. А., Щиплецова Т. И., Митрофанов Д. К., Ветрова Е. Ю. Анализ методов определения нефтепродуктов в почве при разных уровнях ее загрязнения // Плодородие. – 2024. – №5. – С. 86-89. DOI: 10.25680/S19948603.2024.140.18.

10. Бушуев А. А., Шабанов Е. А., Простов С. М. Инженерно-геологические и геофизические изыскания на участке загрязнения нефтепродуктами грунтов речного порта // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2025. № 6. С. 79–89. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-6-79-89.

11. Бушуев А. А., Шабанов Е. А., Простов С. М. Исследование влияния температуры и влажности на электрофизические свойства нефтезагрязненных грунтов // Труды РАНИМИ. – 2025. – № 8 (46). С. 295-308. DOI: 10.24412/2519-2418-2025-846-295-308.

12. Простов С. М., Шабанов Е. А., Бушуев А. А. Экспериментально-аналитическое обоснование метода непрерывного мониторинга процессов загрязнения грунтов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 101-108. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-101-108, EDN: ARNWHT.