

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

На правах рукописи

Шабанов Евгений Анатольевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА
ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ОЧИСТКИ ГРУНТОВ
ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР**

Специальность: 25.00.36 – «Геоэкология (горно-перерабатывающая промышленность)»

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Простов С. М.

Кемерово 2018

Содержание

Введение.....	4
1. Проблема очистки загрязненных грунтов на предприятиях горной отрасли.....	11
1.1. Загрязнение грунтов вследствие техногенного воздействия деятельности человека.....	11
1.2. Загрязнение грунтов нефтепродуктами на горных предприятиях...	13
1.3. Методы очистки грунтов от загрязнителей.....	16
1.3.1. Классификация методов очистки грунтов от загрязнителей.....	16
1.3.2. Электрохимический метод очистки грунтов.....	19
1.4. Методы мониторинга процессов очистки грунтов от загрязнений...	23
1.4.1. Классификация методов.....	23
1.4.2. Геофизические методы.....	27
1.4.3. Электромагнитные методы.....	30
1.5. Выводы, цель и задачи исследований.....	33
2. Обоснование и разработка способов электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами.....	36
2.1. Исследования взаимосвязи электропроводящих свойств пористых влагонасыщенных грунтов с содержанием в порах нефтепродуктов.....	36
2.2. Разработка алгоритмов и компьютерных программ для расчета локального и интегрального показателя загрязнения грунта нефтепродуктами.....	41
2.3. Экспериментальная проверка расчетных зависимостей.....	46
Выводы.....	48
3. Исследование закономерностей изменений физических и электрических свойств грунтов в процессе очистки их от загрязнителей электрохимическим способом.....	50
3.1. Лабораторные исследования процессов электрохимической обработки грунтов на одномерной модели.....	50
3.2. Лабораторные исследования процессов электрохимической обработки грунтов на объемной модели.....	57

3.3. Испытание метода контролируемой электрохимической очистки грунтов от нефтезагрязнений в натуральных условиях на опытном полигоне.....	72
Выводы.....	92
4. Разработка методик геолого-геофизического мониторинга при управлении режимами электрообработки загрязненных грунтов.....	95
4.1. Разработка методики электрофизического диагностирования.....	95
4.2. Разработка методики и схем контроля процессов электрохимиче- ской очистки грунтов.....	101
4.3. Техничко-экономическое обоснование внедрения разработок.....	108
Заключение.....	110
Список литературы.....	113
Приложения.....	121
Приложение А. Текст программы для расчета концентрации нефтепродукта в составе раствора, заполняющего поровое пространство грунта.....	122
Приложение Б. Текст программы для расчета интегрального показателя загрязнения грунта экотоксикантом.....	124
Приложение В. Титульный лист методических указаний по геолого-геофизическому мониторингу процессов электрохимической очистки грунтовых оснований сооружений от загрязнений нефтепродуктами.....	127

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Проблема очистки грунтов от нефтезагрязнений на горнодобывающих предприятиях (угольных разрезах, шахтах, рудниках) обусловлена большими объемами потребления топлива автомобильным и железнодорожным транспортом, смазочных материалов при эксплуатации горно-добывающего оборудования, технических масел в электросиловых установках. Основные технологические процессы сопровождаются утечками нефтепродуктов в окружающую среду. Продукты переработки нефти содержат токсичные растворимые в воде фракции, кроме того бензины и особенно автомасла содержат до 20% присадок, растворителей, тяжелых металлов. Один литр отработанного масла может отравить 1 млн л воды, регенерации подвергается не более 60% от объема отходов. В связи с этим нефтепродукты отнесены к перечню маркерных веществ.

Для контроля процессов очистки грунтов от загрязнений применяют прямые и косвенные инструментальные методы. Прямые методы (инфракрасной спектрофотометрии, ультрафиолетовой люминесценции, газовой и газожидкостной хроматографии) предусматривают наличие сложной аппаратуры, значительную продолжительность анализа и обязательное извлечение пробы грунта, при этом погрешность измерений может достигать 40-50%. Оперативный мониторинг необходим как для диагностирования зон загрязнения, так и для контроля процессов, происходящих при очистке грунтового массива от экотоксикантов. Одним из эффективных методов управления свойствами грунтов, особенно малопроницаемых (с коэффициентом фильтрации $K_f < 10^{-8}$ м/с), является метод электрообработки, основное воздействие которого на загрязненный грунт сводится к электродеструкции экотоксиканта и электроосмотическому перемещению разбавленного загрязнителя в зону механического удаления. Экспериментально-теоретические основы электрохимического метода разработаны применительно к решению задач технической мелиорации (осушения) и закрепления неустойчивых влагонасыщенных грунтов.

Оперативный мониторинг состояния, свойств грунтов и физико-химических процессов в зоне электрообработки может быть обеспечен геофизическими методами, которые являются эффективным дополнением инженерно-геологических изысканий. Весьма перспективными для исследования нефте-

загрязненных грунтов являются электрофизические и электромагнитные методы, основанные на измерении параметров электрических полей, поскольку нефть и нефтепродукты проявляют ярко выраженные диэлектрические свойства и поэтому электрически контрастны. До настоящего времени не изучены и не разработаны следующие аспекты проблемы геолого-геофизического мониторинга процессов электрохимической очистки грунтов от загрязнений нефтепродуктами: не обоснованы способы электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами с учетом структурно-текстурных параметров грунтов, их естественной пористости и влажности; не исследованы закономерности изменения физических и электрических свойств нефтезагрязненных грунтов в зоне электрообработки; не разработаны методики контролируемой электрохимической очистки грунтов от нефтезагрязнений, обеспечивающие рациональные режимы обработки.

На основании изложенного актуальным является развитие экспериментальной, теоретической и методической базы геофизического контроля для совершенствования оперативных методов диагностирования зон нефтезагрязненных грунтов и мониторинга процессов их дезактивации.

Исследования проводились в соответствии с тематическими планами НИР КузГТУ и ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» по хоздоговорным темам №№ 110-2015 и 100-2016, включающим диагностирование аномальных зон в бортах угольных разрезов комплексом геофизических методов, и ООО «НООСТРОЙ» по хоздоговорной теме №101-2017.

Цель работы - научное обоснование и разработка метода оперативного мониторинга процессов загрязнения и электрохимической очистки грунтов от нефтепродуктов при освоении недр для повышения экологической безопасности ведения горных работ, снижения материальных и трудовых затрат на природо-восстановительные работы.

Объект исследований: грунтовые массивы, открытые и в основаниях горнотехнических сооружений (автозаправочных станций, складов ГСМ, электроподстанций, дамб отстойников и др.), загрязненные нефтепродуктами (горючим, машинными, трансформаторными, смазочными маслами).

Предмет исследований: физические процессы в грунтовом массиве при его очистке от загрязнений нефтепродуктами электрохимическим методом.

Основная идея работы состоит в использовании электрической контрастности нефтепродуктов как заполнителей порового пространства грунтов для диагностирования зон загрязнения и контроля процессов в зоне дезактивации при электрообработке.

Основные задачи исследований:

- обоснование и разработка метода электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами при ведении горно-транспортных работ;
- установление закономерностей изменений физических и электрических свойств грунтов в процессе их очистки от загрязнителей электрохимическим методом;
- разработка методики геолого-геофизического мониторинга при управлении режимами электрообработки загрязненных грунтов.

Научные положения, выносимые на защиту:

- для электрофизического контроля степени загрязнения грунтов целесообразно использовать зависимости удельного электросопротивления ($УЭС$) от пористости, влажности и гармонического средневзвешенного для двухкомпонентного заполнителя пор; при коэффициенте загрязнения $k < 20\%$ параметр структуры порового пространства для условий Кузбасса принимают в диапазоне $\beta = 1,3-2,2$ и корректируют по нелинейной зависимости от относительного $УЭС$, при этом автоматизация расчета k обеспечивается циклическими алгоритмами определения локальных значений с оптимизацией структурных параметров по минимальному отклонению расчетных от измеренных величин $УЭС$ и интегральных значений с разбиением загрязненной зоны на элементы;
- изменение величины $УЭС$ при контроле электрохимической обработки нефтезагрязненных грунтов происходит за счет электроосмотического переноса смеси «нефтепродукт-влажа-растворитель» в прикатодную область и электрокоагуляции нефтепродукта преимущественно в прианодной области с увеличением размеров частиц грунта, приводящей к снижению содержания фракций $< 0,1$ мм до 1,7 раза, уменьшению влажности на 3-6% и плотности на 3-7%; оба

процесса соответствуют снижению величины k ;

- экспресс-диагностирование зон нефтезагрязнений обеспечивается по положительным аномалиям на графиках электрических зондирований и профилирований, а мониторинг процессов очистки реализуется по относительному изменению эффективного УЭС обрабатываемой зоны, причем моменты корректирования режима определяют по стабилизации величины k .

Методы научных исследований

В работе использован комплекс методов, включающий:

- анализ и обобщение научно-технической информации в областях методов очистки природной среды от загрязнений и методов мониторинга процессов управления свойствами грунтов;
- аналитические методы физики горных пород и электроразведки;
- лабораторные и натурные экспериментальные исследования физических свойств грунтов методами инженерно-геологических изысканий и геофизики;
- методы регрессионного анализа и алгоритмизации при циклической обработке баз данных.

Научная новизна работы заключается:

- в обосновании способа определения содержания нефтепродукта в порах грунта по его электропроводящим свойствам;
- в разработке алгоритмов расчета локальных и интегральных коэффициентов загрязнения грунта нефтепродуктами;
- в установлении основных закономерностей изменений физических свойств нефтезагрязненных грунтов в процессе электрохимической обработки;
- в разработке методик диагностирования зон загрязнения нефтепродуктами на горнотехнических объектах различного типа геофизическими методами и управления режимами электрообработки по данным мониторинга.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- корректным применением апробированных зависимостей физики горных пород и электроразведки;
- применением в лабораторных и натурных исследованиях стандартной измерительной аппаратуры, прошедшей метрологическую проверку, и стан-

дартных методов обработки экспериментальных данных.

Личный вклад автора заключается:

- в аналитическом обосновании способа контроля загрязнения нефтепродуктами по электрическим свойствам грунта;
- в разработке алгоритмов и компьютерных программ для обработки данных геофизического мониторинга;
- в проведении комплекса лабораторных и натурных экспериментальных исследований свойств загрязненных грунтов методами инженерно-геологических изысканий и геофизики, обработке и анализе их результатов;
- в разработке методик диагностирования зон нефтезагрязнений и управления режимом электрохимической обработки загрязненных грунтов на основе непрерывного мониторинга.

Научное значение работы заключается в расширении знаний о взаимосвязях между физико-механическими и электрическими свойствами горных пород при их загрязнении нефтепродуктами, а также о закономерностях гидродинамических и физико-химических процессов, протекающих в зоне электрообработки загрязненных грунтов.

Отличие от ранее выполненных работ заключается:

- в новом подходе к расчету УЭС трехфазной среды с учетом объемного соотношения компонентов заполнителя пор;
- в идеях циклического подбора структурных параметров и разбиения зоны загрязнения на элементы при расчетах локального и интегрального коэффициентов загрязнения;
- в установлении диапазонов изменения физико-механических и электрических параметров нефтезагрязненных грунтов и взаимосвязи между ними;
- в новых принципах геолого-геофизического мониторинга при управлении режимами электрохимической очистки грунтов.

Практическая ценность работы состоит:

- в разработке методик и компьютерных программ для обработки результатов геофизических исследований зон нефтезагрязнений (свидетельства гос. регистрации №2015614431 и №2015614447);

- в разработке методик и рекомендаций по контролируемой очистке грунтов от нефтезагрязнений электрохимическим методом на горнотехнических объектах различного типа при их эксплуатации и закрытии.

Реализация работы

Основные положения разработанных методик вошли составной частью в «Методические указания по геолого-геофизическому мониторингу процессов электрохимической очистки грунтовых оснований сооружений от загрязнений нефтепродуктами.- Кемерово,- 2017. - 30 с.», разработанные КузГТУ и ООО «НООЦЕНТР» и согласованные с НИИОСП им. Н. М. Герсевича и принятые к использованию ОАО «Кузбассгипрошахт» при разработке проектов предприятий горной отрасли.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы рассмотрены: на X международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (Кемерово, 2013 г.); на научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия Молодая» (Кемерово, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.); на международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс» (Кемерово, 2014, 2016 гг.); на Taishan Academic Forum- Project on Mine Disaster Prevention and Control «Mining 2014» (Qingdao China, 2014г); на Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена – 2015» (Новосибирск, 2015 г.); на международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2016 г.); на 8th Russian-Chinese Symposium «Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety» (Кемерово, 2016 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 7 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, получено 2 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

Объем работы

Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, изложена на 127 страницах машинописного текста, включает 57 рис. , 20 табл., список литературных источников из 118 наименований, 3 приложения.

Содержание диссертации соответствует п.3.4 «Развитие опасных технико-природных процессов, методы и технические средства прогноза, оперативного обнаружения и устранения последствий чрезвычайных ситуаций при разработке природных и техногенных месторождений и переработке твердых полезных ископаемых» и п.3.8 «Технические средства контроля и мониторинга состояния окружающей среды при освоении недр» паспорта специальности 25.00.36. – «Геоэкология (горно-перерабатывающая промышленность)».

Автор и научный руководитель выражают благодарность генеральному директору ООО «НООЦЕНТР» канд. техн. наук О. В. Герасимову за значительную материальную и организационную помощь в проведении лабораторных и натурных экспериментальных исследований.

1. ПРОБЛЕМА ОЧИСТКИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ГОРНОЙ ОТРАСЛИ

1.1. Загрязнение грунтов вследствие техногенного воздействия деятельности человека

Экологическая обстановка, сложившаяся в пределах Кемеровской области, и особенности проблем окружающей среды определяются развитием в области промышленности и преобладанием городского населения. Особенностью промышленности Кемеровской области является добыча и первичная переработка минерального сырья и, прежде всего, угля. Основной объем образования отходов напрямую зависит от развития отраслей в Кузбассе (рис.1.1) [1].

По данным исследований, приведенных в работе [2], в угольной промышленности Кузбасса действуют 62 шахты, 57 разрезов и 49 обогатительных фабрик и установок. Их производственная мощность составляет 245 млн тонн в год по добыче угля, а по переработке – 166 млн тонн.

Под загрязнением грунтов понимается снижение биологических функций и экономического значения в результате поступления в них вредных веществ, то есть химических загрязнителей, ухудшающих состояние окружающей среды.

В целях устранения загрязнения грунтов определяют их источники. Источниками загрязнения признаются объекты, с которых осуществляется сброс или иное поступление в грунт вредных веществ, ухудшающих качество почвы и грунта, ограничивающих их использование.

Источники загрязняющих веществ разнообразны, также многочисленны виды отходов и характер их воздействия на литосферу. Источниками загрязнения грунтов и почв неорганическими веществами служат различные объекты горнодобывающей и горно-перерабатывающей промышленности (особенно хвостохранилища, отстойники, отвалы, шламонакопители и т.п.), химической и металлургической промышленности, предприятия топливно-энергетического комплекса (прежде всего работающие на угле), военной, перерабатывающей и машиностроительной промышленности [3,4].

Основными источниками загрязнения грунтов на горнодобывающих и обогатительных предприятиях в Кузбассе являются сооружения по очистке промышленных стоков и сточных вод (грунтовые фильтры); топливо-

заправочные пункты; котельные и теплоэлектростанции; сухие и гидроотвалы; шламоотстойники обогатительных фабрик.

Данные по источникам загрязнения одного из крупнейших угледобывающих предприятий Кузбасса ОАО «Кузбассразрезуголь» приведены в табл.1.1.



Рис. 1.1. Распределение объема образования отходов по основным отраслям промышленности, %

Таблица 1.1

Количество источников загрязнения по филиалам
ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»

Источник загрязнения	Филиал ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»						
	Кедров-ский	Мохов-ский	Бачат-ский	Красно-бродский	Талдин-ский	Калтан-ский	Итого по УК
Склады ГСМ	1	3	2	3	3	2	14
Котельные	1	3	1	5	3	2	15
Обогатитель-ные фабрики / комплексы	1/2	0/2	2/1	1/2	0/1	-	4/8
Гидро фильтры	3	1	0	2	1	5	12
Шламоотстой-ники / гидро-отвалы	2/1	2/2	2/0	2/0	1/1	2/0	11/4
Сухие отвалы	4	7	4	9	11	7	42

На территории Кемеровской области расположено значительное количество котельных, работающих на твердом топливе – угле. В результате сжигания

угля образуется твердые отходы (шлак и зола), которые складываются и хранятся на поверхности грунта, что ведет к загрязнению грунта химическими элементами, содержащимися в золе и шлаке. Содержание некоторых химических элементов в золошлаковых отходах превышают предельно допустимую концентрацию (ПДК). В работах [5, 6] обоснованы методики определения гранулометрического состава тонкодисперсных угольных материалов в поверхностных водах и отходах, которые используются для контроля экспертизы экологического состояния природной среды. Результаты комплексных экологических исследований отходов предприятий угольной отрасли использованы при разработке программ экологической безопасности.

На территории Кемеровской области эксплуатируется 331 сооружение по очистке сточных вод, в том числе 164 сооружения по очистке промышленных стоков, 20 сооружений по очистке ливневых стоков и 147 сооружений по очистке хозяйственно-фекальных и смешанных с ними сточных вод. Мощность очистных сооружений, после которых сточные воды сбрасываются в поверхностные водные объекты, - 762,4млн куб. метров.

Основные загрязнители грунтов на промышленных предприятиях следующие: отходы нефтепродуктов, продуктов переработки нефти, угля, газа, горючих сланцев и торфа [7, 8], отходы неорганических кислот, соединения азота, нитриты, сульфаты, металлургические шлаки, съемы и пыль, минеральные шламы, соли тяжелых металлов, фенолы, хлорорганика, радионуклиды. Только в угольной золе содержится до 70 различных элементов, в т. ч. высокотоксичных (мышьяк - 200 г/т, уран - 400 г/т, свинец - 200 г/т), а содержание в грунтах таких токсичных веществ, как кадмий (0,3 - 0,88 мг/кг), никель (21,5 - 28,9 мг/кг) и цинк (71,3 - 76,9 мг/кг) превышает ПДК в несколько раз.

1.2. Загрязнение грунтов нефтепродуктами на горных предприятиях

Согласно источнику [8] загрязнение нефтепродуктами относится к химическим техногенным воздействиям. Нефть - горючее ископаемое, являющееся одним из важнейших источников жидкого топлива, смазочных масел, а также сырья для химической промышленности. Она представляет собой жидкость от светло-коричневого до темно-бурого цвета. Плотность нефти колеблется от

0,65 до 1,05 г/см³. Нефти с плотностью ниже 0,83 г/см³ называются легкими, с плотностью 0,83 - 0,86 г/см³ - средними, а с более высокой плотностью - тяжелыми. Нефть растворима в органических растворителях, в обычных условиях не растворима в воде, но может образовывать с ней стойкие эмульсии.

По химическому составу нефть представляет собой сложнейшую смесь, содержащую около 1000 индивидуальных веществ. Из них большая часть - углеводороды (более 500), составляющие обычно 80 - 90 % по массе и гетероатомные органические соединения (4-5 %, по массе), преимущественно сернистые (около 250) и азотистые (более 80). Из остальных соединений следует отметить растворенные в нефти углеводородные газы C₁-C₄ в количестве 1-4 %, металлоорганические соединения (ванадиевые и никелевые), соли органических кислот, минеральные соли и воду (до 10%). Углеводородный состав нефти представлен парафиновыми углеводородами (30-50%, по объему), нафтеновыми углеводородами (25-75%) и ароматическими соединениями (10-35%).

Экологическая опасность загрязнения геологической среды нефтепродуктами определяется следующими факторами: степенью токсичности; скоростью разложения; характером изменений, происходящих в экосистемах. Эта опасность зависит от соотношения содержания тяжелого остатка и легких фракций (табл.1.2).

Таблица 1.2

Классификация нефтепродуктов по соотношению содержания фракций [8]

Содержание тяжело- го остатка, %	Содержание легких фракций, %		
	0	0-30	> 30
0	-	A ₁	A ₂
0-15	B ₁	B ₂	B ₃
> 15	C ₁	C ₂	-

Токсичность нефтепродуктов для живых организмов наиболее велика в группах A₂ и C₁. В группе A₂ токсический эффект наступает быстро, но действует короткое время, т. к. эта группа наименее устойчива в грунтах. В группе C₁ токсический эффект наступает медленнее, однако продукты этой группы довольно устойчивы в грунтах и разлагаются в течение многих лет. Токсическое действие нефтепродуктов повышается с увеличением содержания ароматиче-

ских углеводородов (табл.1.3)

Таблица 1.3

Содержание углеводородов в бензинах, дизельном топливе и автomasлах [8]

Нефтепродукт	Углеводородные группы, %		
	Парафиновые и нафтеновые	Ароматические	Непредельные
Автомобильные бензины			
А76	77,4	5,2	17,4
Б70	83,8	17,0	0
Авиационные керосины			
ТС-1	58,7	16,2	0,7
Т-5	23,3	18,9	0,6
Дизельные топлива			
ДЛ	93,9	5,4	-
З	82,4	16,8	-
Масло автомобильное			
АК-10	56,5	40,0	-

Наибольшее количество ароматических углеводородов содержится в автомобильном масле, поэтому наиболее серьезные загрязнения почв и горных пород возникают в местах слива отработанного масла, в районах автобаз, на автостоянках и т. д. При отсутствии четкой системы сбора и регенерации более 40% отработанного машинного масла нелегально сливается в почву, грунты и водоемы. Минеральные отработанные масла содержат до 20% различных добавок, растворителей, тяжелых металлов (Pb, Zn, Fe, Ba), полициклических ароматических углеводородов и др. Всего один литр отработанного масла может отравить 1 млн л воды.

Актуальность проблемы очистки грунтов от нефтезагрязнений на горнодобывающих предприятиях Кузбасса (угольных разрезах, шахтах, рудниках) обусловлена следующими факторами:

- потреблением больших объемов топлива автомобильным и железнодорожным транспортом, что приводит к значительным утечкам на заправочных пунктах;
- применением больших объемов смазочных материалов при эксплуатации горнодобывающего (экскаваторы, бурстанки, бульдозеры), транспортного (автомобили, подвижной железнодорожный состав, конвейеры) оборудования;
- применением минеральных масел в силовых трансформаторах и электрокоммутационных приборах в качестве охлаждающих и изолирующих жид-

костей.

Объемы отходов нефтепродуктов по Кедровскому угольному разрезу приведены в табл.1.4.

Таблица 1.4

Объемы отходов нефтепродуктов по Кедровскому угольному разрезу

Наименование отхода	Класс опасности	Годовой объем, т/г
1. Масла моторные отработанные	3	66,1
2. Масла трансмиссионные отработанные	3	8,3
3. Масла гидравлические отработанные	3	9,3
4. Обтирочный материал, загрязненный маслами (содержание масел > 15%)	3	5,9

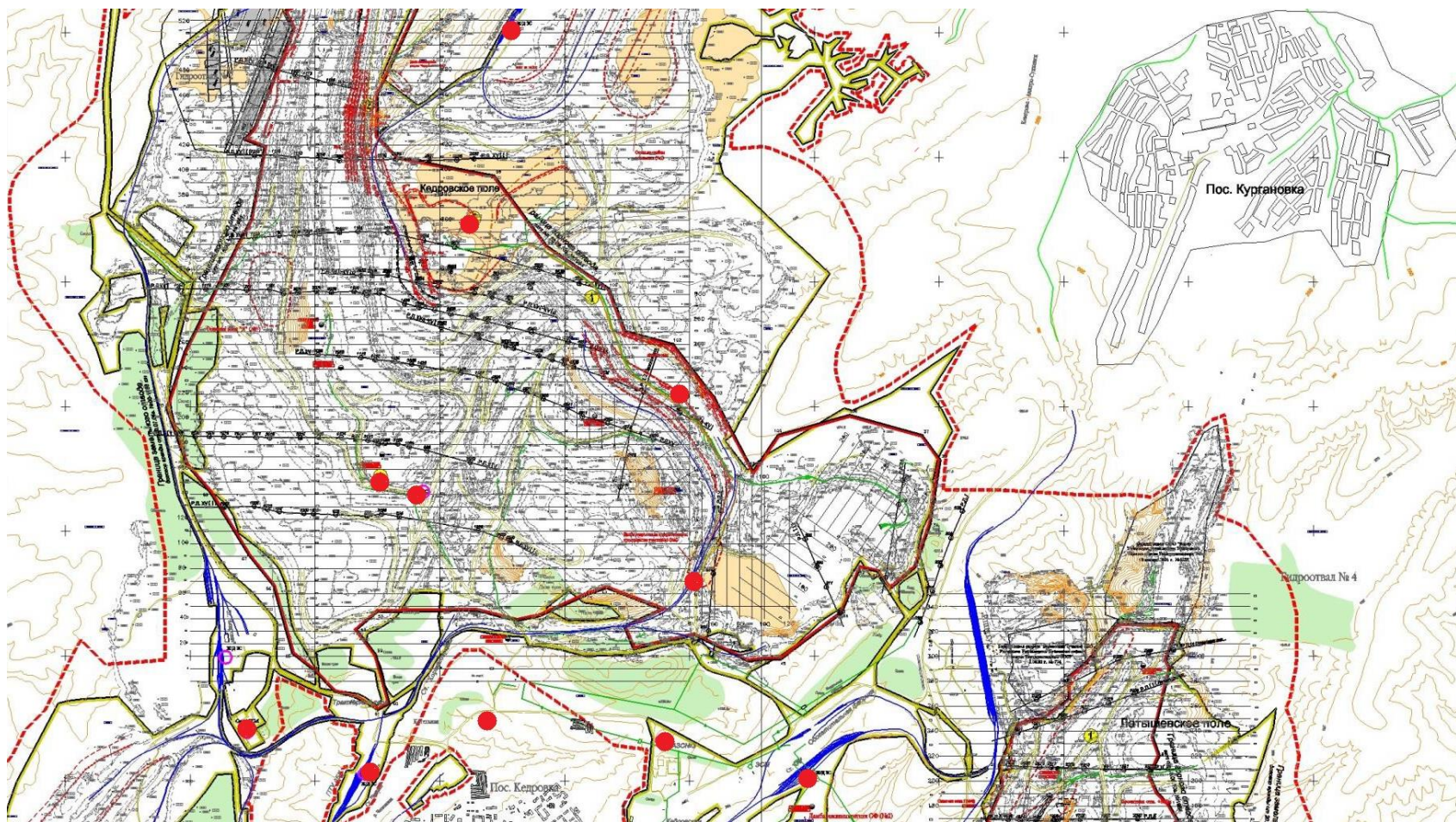
На плане горных работ Основного поля и Латышевского участка по данным маркшейдерского отдела Кедровского угольного разреза зафиксировано 12 объектов загрязнения грунтов нефтепродуктами (рис. 1.2.). Визуальный осмотр складов горючесмазочных материалов, стационарных и передвижных автозаправочных станций (АЗС) показал наличие луж различного горючего (бензин, дизельное топливо), образование которых связано с неисправностями заправочных систем и небрежностью обслуживающего персонала. Общая площадь участков, загрязненных нефтепродуктами (бензином, дизельным топливом), составляет 7–10 тыс. м².

1.3. Методы очистки грунтов от загрязнителей

1.3.1. Классификация методов очистки грунтов от загрязнителей

Методы очистки от нефтезагрязнений делятся на четыре типа: физические, химические, физико-химические [9, 10], биохимические [11-13].

Сформировались три основных подхода к устранению нефтезагрязнений: непосредственное удаление нефтепродукта за счет его извлечения из грунта; подавление активности (детоксикации) нефтепродукта на месте [14, 15], непосредственно в массиве; локализация нефтепродукта в массиве за счет создания вокруг аномалии защитного экрана, препятствующего дальнейшему распространению нефтезагрязнений [16, 17].



● - источник загрязнения нефтепродуктами

Рис. 1.2. Общая схема расположения источников загрязнения нефтепродуктами на плане горных работ

Первый из них – прямая очистка грунтов, предусматривающая непосредственное удаление вредных компонентов за счет их извлечения из объекта, очистки тем или иным способом. При этом изъятые из массива загрязнители подлежат дальнейшей утилизации уже вне массива каким-либо способом.

Второй подход основан не на удалении, а на подавлении активности (детоксикации) вредного компонента на месте, непосредственно в самом массиве, например, путем его нейтрализации [18-20], разложения (деструкции), связывания и т. п. [21]. При этом изъятия загрязнителей из массива не происходит, они разрушаются или переводятся в нетоксичные формы на месте. Деструкция загрязнителя предполагает постепенное разложение его молекул на более простые соединения или на составляющие нетоксичные элементы под действием физических, химических, физико-химических или биологических факторов [22-24].

Третий подход основан на локализации загрязнителей в массиве за счет создания вокруг аномалии защитного экрана, препятствующего дальнейшему распространению загрязнений [25].

Классификация основных методов очистки грунтов в массивах от загрязнителей по функциональным признакам представлена на рис. 1.3. В классификации выделяются типы методов очистки по природе оказываемого при этом воздействия: физического, физико-химического, химического или биологического.

Там, где загрязнение почв или массивов горных пород носит экологически угрожающий характер и где естественные процессы самоочищения грунтов не могут обеспечить удаление загрязнителей, приходится использовать искусственные методы очистки.

Классификация основных методов очистки грунтов в массивах от загрязнителей по механизму и принципу воздействия представлена в табл. 1.5. В классификации выделяются указанные выше типы методов очистки по природе оказываемого при этом воздействия: физического, физико-химического, химического или биологического. Внутри каждого типа методов могут выделяться различные методы, отличающиеся друг от друга по механизму того или иного оказываемого на загрязнитель воздействия.



Рис. 1.3. Классификация методов очистки загрязненных грунтов

1.3.2. Электрохимический метод очистки грунтов

Из существующих методов и способов очистки грунтов от промышленных загрязнителей (рис. 1.3), потенциально перспективным является электрохимический метод. Данный метод активно используется для закрепления грунтового массива [26-29], однако полученные научно-практические результаты свидетельствуют о возможности его применения для экологических целей [30-35]. Отличительной особенностью метода является возможность его применения для очистки грунтов с низкой фильтрационной способностью непосредственно на месте загрязнения, без выемки и перемещения грунта.

Таблица 1.5

Классификация методов очистки грунтов

Методы очистки		Принцип воздействия		
Тип метода	Механизм воздействия	Локализация загрязнителя	Деструкция загрязнителя	Удаление загрязнителя
Физический	Механический	Механические экраны	Механическое разрушение	Механическое удаление
	Гидродинамический	Инъекционные экраны		Промывка Фильтрация
	Аэродинамический		Газовая нейтрализация	Вакуумирование Продувка Экстракция
	Термический	Термоэкраны (витрификация) Термолокализация	Термодеструкция (нагревание, обжиг, плавление) Термодезинфекция	Термоосмос
	Электрический		Электролиз Электродеструкция	Электрохимическое удаление Электроосмос Электрофорез Электромиграция Электродиализ
	Электромагнитный	СВЧ-экраны	Ультрафиолетовая деструкция	Магнитная сепарация
Физико-химический	Испарение			Удаление летучих
	Растворение Диффузия			Разбавление Выщелачивание Диффузиофорез
	Ионный обмен	Ионообменные экраны	Ионообменная детоксикация	
	Сорбция	Сорбционные экраны	Сорбционная детоксикация	
Химический	Гидролиз		Гидролитическое разложение	
	Фотолиз		Фоторазложение	
	Нейтрализация	Химическая иммобилизация	Нейтрализация кислот или оснований	Реагентное выщелачивание Окисление
	Окисление		Окисление Дезинфекция	
Биологический	Биопоглощение	Биосорбционные экраны	Биодетоксикация Биосорбция	Фитопоглощение Микробиопоглощение
	Биодеградация		Микробиодеструкция (активизация биодеструкции или внесение культур)	Биовыщелачивание

Экспериментально-теоретические основы электроосмотических процессов, изложенные в [36], нашли практическое применение в мелиорации (водопонижение и осушение) и строительстве (закрепление грунтов химическими растворами) [37, 38]. Ввиду сложности и недостаточной изученности комплекса проходящих при электрообработке физико-химических процессов, а также энергоемкости данного метода, он не получил массового распространения.

Идея использования электрохимического метода для очистки грунтов от нефтезагрязнителей и других экотоксикантов развивается в МГУ под руководством проф. В. А. Королева. Результаты фундаментальных исследований электроповерхностных явлений в глинистых породах доказали практическую значимость данного направления исследований [39–42].

В основе этого метода лежит электроосмотическое перемещение экотоксиканта, предварительно переведенного в подвижное состояние с помощью реагентов. В процессе очистки загрязнения перемещаются вдоль силовых линий электрического поля, распределение которых зависит от расположения электродов, скорость перемещения загрязнителя при этом зависит от напряженности поля, что позволяет контролировать процесс очистки и управлять им. Исходные концентрации экотоксикантов могут быть снижены с 10-50 до 1-10 мг/кг, что вполне укладывается в существующие нормы.

Из классических представлений электрохимии электроосмотическое течение раствора в единичном капилляре подчиняется уравнению Гельмгольца - Смолуховского, полученного интегрированием функции потенциала двойного электрического слоя, возникающего на границе адсорбирующей поверхности твердой фазы с электролитом [36]:

$$\bar{V} = -\frac{\varepsilon \cdot \zeta}{\mu} \cdot \text{grad } \varphi, \quad (1.1)$$

где \bar{V} - средняя по сечению капилляра скорость течения, м/с; ε - абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м; μ - коэффициент динамической вязкости раствора, Па·с; ζ - электрокинетический потенциал, В; φ - потенциал внешнего электрического поля, В.

Зависимость для модуля эффективной скорости $V_{\text{Э}}$ (расхода) получена на

основе анализа размерностей:

$$V_{\text{э}} = C\sigma_0 \frac{m^2 R}{\mu} E = \frac{m\zeta\varepsilon}{\mu} E = K_{\text{э}} E, \quad (1.2)$$

где C - постоянная; σ_0 - удельная объемная плотность зарядов ионов диффузного слоя, Кл/м³; m - пористость грунта; R - гидравлический радиус пор, м; $K_{\text{э}}$ коэффициент электроосмотической активности, м²/(В·с); E - напряженность поля, В/м.

В работе [43] предложено в знаменатели приведенных формул ввести эффективное удельное электросопротивление массива (УЭС) ρ , поскольку интенсивность электроосмотических и электрофильтрационных процессов определяется не напряженностью поля E , а плотностью тока.

Рассмотрим влияние приведенных выше параметров среды на эффективность электроосмотического воздействия.

Экспериментальные данные о диапазонах изменения коэффициентов электроосмотической активности $K_{\text{э}}$ и фильтрации $K_{\text{ф}}$, полученные различными отечественными и зарубежными авторами [38], m для условий угольных месторождений Кузбасса [44]) представлены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Диапазоны основных параметров грунтов в зонах электроосмотической обработки

Тип грунта	$K_{\text{э}}, \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$K_{\text{ф}}, \text{м/с}$	m
Супеси	$(3,8-8,5) \cdot 10^{-1}$	$(2,2-3,2) \cdot 10^{-6}$	0,180-0,443
Суглинки	$(0,6-10) \cdot 10^{-1}$	$7,2 \cdot 10^{-10} - 8 \cdot 10^{-7}$	0,195-0,481
Глины	$(1,77-13) \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-11} - 6 \cdot 10^{-10}$	0,187-0,533
Ил	$(0,9-3) \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-12} - 10^{-10}$	-

Из представленных данных следует, что величина $K_{\text{э}}$ для всех видов грунтов относительно стабильна, поскольку ее изменение не превышает одного порядка, вместе с тем диапазон изменения $K_{\text{ф}}$ достигает 6 порядков. Поскольку в легко проницаемых породах при $K_{\text{ф}} > 10^{-8} - 10^{-7}$ м/с (супеси, пески, гравелиты) водопонижение или водонасыщение вполне осуществимо традиционными напорными методами, электроосмотическая обработка технически целесооб-

разна только при $K_{\phi} < 10^{-7}$ м/с (10^{-2} м/сут).

Другим не менее важным параметром, определяющим эффективность применения электроосмотической обработки грунтов, является удельное электросопротивление (УЭС) грунтов. Экспериментально установлено, что диапазон оптимальной плотности тока составляет $j = 6-20$ А/м². При напряжении силового источника питания $U < 100$ В данный режим обработки соответствует $\rho < 2-20$ Ом·м [38, 45].

На основании исследований ПО «Спецтампонажгеология» [37] по степени эффективности электроосмотической обработки грунты разделены на 3 основные группы (табл. 1.7).

Таблица 1.7

Классификация пород и грунтов
по степени эффективности электроосмотической обработки

Параметр	Наиболее эффективна	Ограниченно эффективна	Неэффективна
K_{ϕ} , м/с	$<10^{-8}$	$10^{-8}-10^{-6}$	$>10^{-6}$
K_{ϕ}/K_{ϕ} , м/В	$>10^7$	10^7-10^5	$<10^5$
ρ_k , Ом·м	<8	8-20	>20

Для контроля физических процессов в зоне обработки, изменения концентрации загрязняющих веществ и управления основными технологическими параметрами целесообразно использование комплекса методов мониторинга.

1.4. Методы мониторинга процессов очистки грунтов от загрязнений

1.4.1. Классификация методов

Как указывалось в п.1.2, нефть и нефтепродукты являются жидкими токсичными веществами. Контакт человека с нефтью вызывает сухость кожи, пигментацию или стойкую эритему, приводит к образованию угрей, бородавок на открытых частях тела. Острые отравления парами нефти вызывают повышение возбудимости центральной нервной системы, снижение кровяного давления и обоняния. Нефть содержит легколетучие вещества, вызывающие повышенную заболеваемость органов дыхания, функциональные изменения со стороны цен-

тральной нервной системы.

Аварийные разливы нефти вызывают сильные и частично необратимые повреждения природных комплексов [46-48]. При дозах нефти 250 мг/кг почвы снижалась всхожесть контрольных семян примерно на 50%, а при дозах 400 мг/кг - полностью подавлялась. Легкие фракции нефти (бензиновая и дизельная) еще более фитотоксичны: снижение всхожести контрольных семян на 50% происходило при дозах нефти 150 и 90 мг/кг. Тяжелые фракции нефти (моторное масло и гудрон) не оказывали фитотоксичного действия на тест-растения даже при очень высоких дозах.

Загрязнение почвы нефтью приводило к необратимым изменениям микробиологических свойств почвы. При дозах до 300 мг/кг почва становилась основным трофическим субстратом для углеводородокисляющих микроорганизмов. Другие виды микроорганизмов, растения и животные находились в угнетенном состоянии. Превышение этой дозы практически полностью подавляло биологическую активность почвы [49-50].

Установлена ПДК нефтяных паров и опасных веществ в воздухе рабочей зоны, равная 10 мг/м³. ПДК в воде водных объектов не более 0,1 мг/дм³ - для нефти 3, 4 классов, и не более 0,3 мг/дм³ - для нефти 1, 2 классов. Гигиенический норматив нефти в почве не установлен [51].

Для инструментальной количественной оценки содержания нефтепродуктов в грунте существуют прямые и косвенные методы.

Под прямыми понимают методы определения с помощью специального оборудования непосредственной массы нефтепродукта, находящегося в образце грунта определенного объема. Существуют 4 метода прямого определения содержания нефтепродуктов в грунте (рис. 1.4): инфракрасной спектрофотометрии; ультрафиолетовой люминесценции; газовой хроматографии; газожидкостной хроматографии.

Все органические вещества имеют в инфракрасном диапазоне (ИК) свои индивидуальные спектры поглощения. Положение полос поглощения в ИК-спектрах веществ характеризуется длиной волны λ , нм (мкм). Для ИК-анализа углеводородов используют диапазон от 0,7 до 25 мкм, который обычно подразделяют на три области: ближнюю – 0,7-2,5 мкм, область основных частот – 2,6-6 мкм, дальнюю – 6-25 мкм.

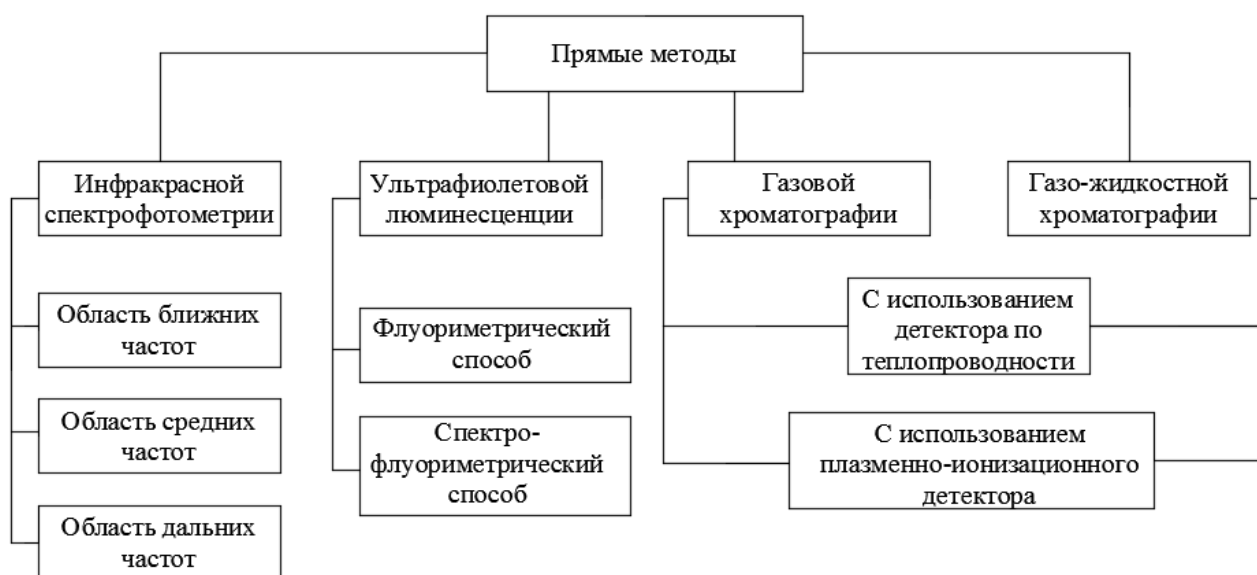


Рис. 1.4. Прямые методы определения содержания нефтепродуктов

Ближняя ИК-область для аналитических определений в технологических и экологических целях в нашей стране в отличие от многих развитых стран практически не осваивается. Наиболее широко используется область основных частот. Нормативные документы по анализу суммарного загрязнения окружающей среды нефтепродуктами с ИК-спектроскопическим окончанием регламентируют проведение измерений в интервале длин волн 3,3-3,5 мкм. Стандартная смесь, содержащая 37,5% изооктана, 37,5% цетана, 25% бензола, предназначена для калибровки приборов в этой области [52]. Дальняя ИК-область используется в основном для идентификации источника загрязнения, а также для определения типов нефтепродуктов по показателю ароматизированности и для структурно-группового анализа.

Метод спектроскопии предназначен для установления наличия в составе пробы нефтезагрязнителя, но не позволяет оценить степень загрязнения.

Существующие люминесцентные методы оценки нефтяного загрязнения характеризуются высокой чувствительностью. Они позволяют определять микроэлементы, а также суммарное содержание загрязняющих органических веществ и индивидуальных органических соединений.

Приборы для люминесцентного анализа могут быть разделены на две группы: флуориметры и спектрофлуориметры. В флуориметрах используют

светофильтры, а в спектрофлуориметрах – дифракционные решетки.

В нашей стране наибольшее распространение получил люминесцентно-фотометрический анализатор «Флюорат-0,2». В этом приборе источником возбуждения люминесценции служит газоразрядная лампа (для измерения нефтепродуктов - ксеноновая). Несмотря на высокую чувствительность люминесцентного метода, при использовании приборов типа «Флюорат-0,2» для измерения суммарного содержания нефтепродуктов возникает проблема калибровки прибора по стандартному раствору, что необходимо для получения достоверных данных. Однако, до настоящего времени такой стандартный раствор для люминесцентных методов отсутствует. Стандартный раствор изооктан - цетан - бензол, используемый для ИК-спектрометрии, изготавливается на четыреххлористом углероде, который поглощает в рабочей области флуориметра, поэтому калибровку проводят по какому-либо известному нефтепродукту, например маслу Т-22 [53]. В результате при измерениях «тяжелых» нефтепродуктов (мазут и прочие) прибор может дать погрешность до 40-50%, а при определении «легких» нефтепродуктов (бензин и прочее) результаты измерений концентрации могут быть занижены в несколько раз. Следует отметить, что в европейских странах данные методы анализа применяются мало [54].

Наиболее перспективными для мониторинга нефтепродуктов с одновременной идентификацией и расшифровкой химического состава являются методы газовой, газожидкостной или высокоэффективной жидкостной хроматографии. Наиболее распространен газохроматографический метод, особенно в сочетании с инфракрасной-спектрометрией, позволяющий определять индивидуальные компоненты в смеси нефтепродуктов, что делает этот метод анализа незаменимым при установлении источника загрязнения почв, идентификации веществ нефтяного происхождения в процессе биodeградации, при исследовании процессов разрушения нефтепродуктов. Однако при выполнении массовых анализов его использование ограничено низкой производительностью и высокой стоимостью аналитических работ.

В основе всех предложенных методов лежит извлечение нефти и нефтепродуктов из проб органическими растворителями. Почва является очень трудным объектом анализа, поскольку ее органическая часть довольно сложна и разнообразна по составу. При разработке оперативных методов мониторинга,

исключающих обязательное извлечение загрязнителей (поллютантов) для локализации зон загрязнения и контроля изменения концентрации экотоксиканта, возрастает значение косвенных методов мониторинга [55, 56].

1.4.2. Геофизические методы

Геофизические (косвенные) методы определения концентрации нефтепродуктов сводятся к исследованию грунтового массива геофизическими способами и оценке состояния массива путем перехода от результатов геофизического мониторинга к концентрации нефтепродуктов с помощью аналитических зависимостей.

Геофизические способы контроля очень разнообразны. Их классификации разнообразны и базируются на физических и технологических признаках и критериях [57,58]. Так, по видам используемых физических полей и явлений выделяют методы, основанные на применении полей упругих волн, электростатических и электромагнитных полей, гравитационных полей, газово-эманационные методы [59-61]. По технологии производства работ выделяют аэрокосмические, наземные, подземные, скважинные и комбинированные методы. Среди методов, основанных на применении полей упругих волн, электростатических и электромагнитных полей, выделяют методы с использованием искусственно создаваемых и естественных полей [62].

Укрупненная классификация геофизических методов геоконтроля приведена на рис. 1.5.

Геофизические методы мониторинга основаны на взаимосвязи параметров состояния и свойств массива горных пород (геологическое строение, трещиноватость, напряженное состояние, влажность пористость) с параметрами разнообразных физических полей [63-65].

Геоакустический контроль состояния грунтового массива в основном используется для оценки качества производства работ по тампонажу массива. Более подробно геоакустический контроль, результаты применения для этих целей аппаратуры и методики геоакустического контроля приведены в трудах [66-68]. Метод акустического каротажа и межскважинного прозвучивания осуществляли с помощью различных экспериментальных и серийных измерительных установок, которые показали хорошие результаты.



Рис. 1.5. Укрупненная классификация методов геофизического геоконтроля

Геоакустический контроль применяется для оценки состояния искусственного замораживания грунтов [69]. С помощью этого метода возможен контроль следующих процессов: замораживание грунтов, наличие незамороженных участков (окон), размеры ледогрунтового защитного ограждения, упругие и прочностные параметры замороженных грунтов.

Геофизическая модификация велосимметрического метода дает возможность контролировать затюбинговое пространство горных выработок [70]. С помощью акустоэмиссионного метода можно осуществлять контроль за внезапными выбросами угля и газа при разработке угольных пластов [71,72].

Сейсмоакустические (звукометрические) методы исследования скважин основаны на изучении времени пробега упругих волн по породам, окружающим стенки скважин, от пункта возбуждения до сейсмоприемников. При сейсмическом каротаже упругие волны возбуждаются с помощью взрывов или электрических дуговых разрядов, а время прихода колебаний частотой 50 - 200 Гц измеряется при разном погружении сейсмоприемников по стволу скважины. С помощью сейсмического каротажа определяются пластовые и средние скорости распространения упругих волн, необходимые для интерпретации результатов полевой сейсморазведки. Результаты можно использовать и для документации разрезов по изменению упругих свойств, пористости, плотности пород [73,74].

Ультразвуковая дефектоскопия - это метод, основанный на исследовании процесса распространения ультразвуковых колебаний с частотой 0,5-25 МГц и

дальнейшего анализа их амплитуды, времени прихода, формы и других характеристик в контролируемых изделиях с помощью специальной ультразвуковой аппаратуры [75]. С целью получения данных о механических характеристиках пород вокруг выработки проводились исследования ультразвуковой аппаратурой на Анжерском месторождении Кузбасса [76].

Теплофизический контроль состояния массива горных пород основан на измерении термодинамических параметров (теплопроводность и температуропроводность) образцов и массива. Наиболее доступный метод измерения температуры – термоэлектрический, основанный на применении терморезисторов, электрическое сопротивление которых зависит от температуры. Возможно использование спиртовых и ртутных термометров. Бесконтактное измерение температуры поверхности массива можно производить при помощи высокоэффективных источников и приемников инфракрасного излучения и пировидиконов, а также лазерных пирометров, в принципе действия которых используется зависимость частоты отраженного лазерного излучения от температуры контролируемой поверхности. Инфракрасный метод обеспечивает непрерывный дистанционный контроль состояния массива по взаимодействию поляризованного инфракрасного излучения с массивом (наблюдение трещиноватости, обводненности, самонагревания массива и др.) [77]. Данный метод не получил достаточного распространения в геоконтроле горного массива, также как радиометрический, основанный на замерах естественной и искусственной радиоактивности массива, и оптический, предполагающий регистрацию оптического излучения горных пород.

Электромагнитные, акустические, радиометрические и теплофизические методы геоконтроля соответствуют требованиям, предъявляемым для решения практических задач. Основной проблемой на пути использования этих методов является сложность интерпретации результатов измерений, поскольку параметры физических полей зависят от нескольких факторов.

Наиболее перспективным из перечисленных является электромагнитный метод геоконтроля, основанный на измерении параметров электромагнитных полей (удельного электрического сопротивления, диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости, электрохимической активности и др.). К его положительным чертам можно отнести надежность, оперативность, доступ-

ность аппаратуры, большое разнообразие способов натурных измерений и их геомеханической интерпретации.

1.4.3. Электромагнитные методы

Электромагнитные методы классифицируют в зависимости от применяемой частоты электромагнитного поля: электрические на постоянном токе ($f = 0$) и низкочастотном ($f \geq 10$ кГц) переменном токе, высокочастотные ($f = 10-200$ кГц), радиоволновые ($f = 200$ кГц-3 ГГц), сверхвысокочастотные ($f = 3-300$ ГГц).

По способу передачи электромагнитной энергии существуют контактные (требующие гальванического контакта электрода с массивом) и бесконтактные (предусматривающие зондирование массива переменным электромагнитным полем) методы.

В зависимости от принципа исследования их можно разделить на следующие группы [78-82]: электромагнитное зондирование, электромагнитное профилирование, скважинная электроразведка. Каждый из методов условно делится на 2 подгруппы, использующие квазистационарные и переменные электромагнитные поля.

Основными параметрами контроля являются удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, электрическая прочность, потенциалы стационарных и нестационарных естественных электрических полей [83-93].

На рис. 1.6 приведена классификация электромагнитных методов геоконтроля, практическая реализация которых представлена в технической литературе [83].



Рис. 1.6. Классификация электромагнитных методов геоконтроля

Электромагнитное профилирование основано на исследовании верхней части разреза и состоит в изучении компонент естественного или искусственного поля при ограниченной или фиксированной глубине проникновения тока. Стандартными задачами электромагнитного профилирования являются геологическое картирование, прослеживание рудоконтролирующих или закарстованных зон, поиски рудных и нерудных полезных ископаемых.

Электромагнитное зондирование – способ исследования грунтового массива, основанный на измерении компонент поля в одной или одновременно нескольких точках земной поверхности при последовательном увеличении глубины проникновения электрических токов. Электромагнитное зондирование применяют в основном при региональных, структурно-картировочных и разведочных исследованиях, когда ставятся задачи расчленения геологического разреза на слои и блоки, определения последовательности залегания пластов и картирования тектонических структур, в частности при поисках месторождений нефти и газа.

Скважинной электроразведкой называют способ объемного изучения

межскважинного пространства, основанный на возбуждении и изучении поля как внутри скважин, так и на поверхности земли. Скважинные модификации применяют для поисков залежей полезных ископаемых в околоскважинном и межскважинном пространствах, изучения формы, размеров и компонентного состава залежи, а также для увязки результатов наземных и скважинных наблюдений.

Бесконтактные электромагнитные методы разделяют на активные и пассивные. Для активных методов характерно наличие в измерительной аппаратуре генераторного блока, обеспечивающего зондирование массива переменным электромагнитным полем. Индукционный метод предусматривает измерение вторичного поля вихревых токов, наведенных в проводящем массиве. Индуктивный метод основан на измерении индуктивности антенного контура в проводящей среде, электроемкостной – на зависимости одного из параметров генератора от диэлектрической проницаемости среды, высокочастотное зондирование – на отражении электромагнитной волны от границы геоэлектрической неоднородности. Пассивные бесконтактные методы включают регистрацию параметров (амплитуды, частоты, мощности) естественного электромагнитного излучения в радио-, световом, рентгеновском и гамма-диапазонах. Пассивный геомагнитный метод основан на измерении составляющих вектора напряженности естественного геомагнитного поля высокочувствительным магнитометром. Одним из наиболее совершенных современных методов электромагнитного мониторинга является метод электромагнитного сканирования (георадиолокации), основанный на зондировании массива в широкополосном диапазоне частот и компьютерной обработке отраженного сигнала. В работах [94-96] приведены примеры использования георадиолокации для определения полостей и других неоднородностей внутри грунтового массива. Интересен опыт диагностирования данным методом состояния приконтурной зоны закрепленной выработки [97-99]. Данные методы имеют большие перспективы для электрофизического диагностирования зоны загрязнения. С помощью этих методов возможно выполнить мероприятия по определению размера и месторасположения зоны загрязнения.

Следует отметить, что в научно-технической литературе практически отсутствуют сведения о результатах геофизического (электромагнитного) контроля

процессов, связанных с очисткой грунтовых массивов от загрязнений какого-либо рода, что свидетельствует о недостаточной изученности данного направления мониторинга.

1.5. Выводы, цель и задачи исследований

Анализ проблемы очистки загрязненных грунтов на предприятиях горной отрасли позволил сделать следующие выводы:

1. Предприятия угольной промышленности Кузбасса дают более 90% от общего объема промышленных отходов. Источниками экологического загрязнения на угольных разрезах «УК «Кузбассразрезуголь» являются склады ГСМ, котельные, обогатительные фабрики и комплексы, грунтовые фильтры, гидроотстойники, гидроотвалы и сухие отвалы.

Одними из наиболее опасных загрязнителей грунтов являются нефтепродукты: смазочные материалы и жидкое горючее. Актуальность проблемы очистки грунтов от нефтезагрязнений на горнодобывающих предприятиях (угольных разрезах, шахтах, рудниках) обусловлена большими объемами потребления топлива автомобильным и железнодорожным транспортом, смазочных материалов при эксплуатации горно-добывающего оборудования, технических масел в электросиловых установках. Продукты переработки нефти содержат токсичные растворимые в воде фракции, кроме того бензины и особенно автomasла содержат до 20% присадок, растворителей, тяжелых металлов. Один литр отработанного масла может отравить 1 млн л воды, только на Кедровском угольном разрезе ежегодный объем подобных отходов составляет более 90 т, при этом регенерации подвергается не более 60% от их объема. На плане горных работ зафиксировано 12 источников нефтезагрязнений (склады ГСМ, стационарные и передвижные АЗС), с общей площадью до 10 тыс. м².

2. Методы очистки грунтов от загрязнений по функциональным признакам разделяют на физические, химические, физико-химические и биологические. По механизму и принципу воздействия они предусматривают прямую очистку грунта от вредного компонента, подавление его активным реагентом или локализацию.

Одним из эффективных методов управления свойствами грунтов, особен-

но малопроницаемых (с коэффициентом фильтрации $K_f < 10^{-8}$ м/с), является метод электрообработки, основное воздействие которого на загрязненный грунт сводится к электродеструкции экотоксиканта и электроосмотическому перемещению разбавленного загрязнителя в зону механического удаления. Экспериментально-теоретические основы электрохимического метода разработаны применительно к решению задач технической мелиорации (осушения) и закрепления неустойчивых влагонасыщенных грунтов. Установлены критерии рационального применения данного метода: отношение коэффициентов электроосмотической активности и фильтрации $K_o/K_f > 10^7$ и удельное электросопротивление (УЭС) $\rho < 8$ Ом·м.

3. Для контроля процессов очистки грунтов от загрязнений применяют прямые и косвенные инструментальные методы. Прямые методы (инфракрасной спектрофотометрии, ультрафиолетовой люминесценции, газовой и газожидкостной хроматографии) предусматривают использование сложной аппаратуры, значительную продолжительность анализа и обязательное извлечение пробы грунта, при этом погрешность измерений может достигать 40-50%.

Оперативный мониторинг состояния, свойств грунтов и физико-химических процессов в зоне электрообработки может быть обеспечен геофизическими методами, которые являются эффективным дополнением инженерно-геологических изысканий. Весьма перспективными для исследования нефтезагрязненных грунтов являются электрофизические и электромагнитные методы, основанные на измерении параметров электрических полей, поскольку нефть и нефтепродукты проявляют ярко выраженные диэлектрические свойства и поэтому электрически контрастны.

До настоящего времени не изучены и не разработаны следующие аспекты проблемы геолого-геофизического мониторинга процессов электрохимической очистки грунтов от загрязнений нефтепродуктами: не обоснованы способы электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами с учетом структурно-текстурных параметров грунтов, их естественной пористости и влажности; не исследованы закономерности изменения физических и электрических свойств нефтезагрязненных грунтов в зоне электрообработки; не разработаны методики контролируемой электрохимической очистки грунтов от нефтезагрязнений, обеспечивающие рациональные режимы обработки.

На основании изложенного актуальным является развитие экспериментальной, теоретической и методической базы геофизического мониторинга для совершенствования технологии контролируемой электрохимической обработки нефтезагрязненных грунтов.

Цель работы: научное обоснование и разработка метода оперативного мониторинга процессов загрязнения и электрохимической очистки грунтов от нефтепродуктов при освоении недр для повышения экологической безопасности ведения горных работ, снижения материальных и трудовых затрат на природо-восстановительные работы.

Основные задачи исследований:

- обоснование и разработка метода электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами при ведении горно-транспортных работ;
- установление закономерностей изменений физических и электрических свойств грунтов в процессе их очистки от загрязнителей электрохимическим методом;
- разработка методики геолого-геофизического мониторинга при управлении режимами электрообработки загрязненных грунтов.

2.ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГРУНТОВ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

2.1.Исследования взаимосвязи электропроводящих свойств пористых влагонасыщенных грунтов с содержанием в порах нефтепродуктов

Основная физическая предпосылка метода контроля состоит в том, что все используемые в автомобильном и железнодорожном транспорте нефтепродукты (масла, дизельное топливо, бензин) проявляют ярко выраженные диэлектрические свойства. Эффективное удельное электросопротивление (УЭС) этих жидкостей изменяется в диапазоне $\rho = 10^{10}–10^{12}$ Ом·м, в то время, как для природных минеральных растворов этот диапазон составляет $\rho = 0.1–100$ Ом·м. УЭС влагонасыщенной горной породы, которая представляет собой трехфазную среду, определяется с помощью классической эмпирической зависимости [100–101]:

$$\rho_k = \frac{\alpha K_n}{m^\beta W^\gamma} \rho_v, \quad (2.1)$$

где m – пористость (поровая пустотность); W – коэффициент влагонасыщения пространства пор и трещин; ρ_v – УЭС раствора, заполняющего поровое пространство, Ом·м; K_n , α , β , γ – эмпирические параметры, зависящие от структурно-текстурных особенностей исследуемых грунтов (пород); K_n – параметр, учитывающий поверхностную проводимость глинистого микрослоя на поверхности пор; α – параметр, зависящий от типа геологического отложения; β – параметр, определяемый структурой порового пространства (в основном извилистостью каналов); γ – параметр, зависящий от смачиваемости раствором поверхности пор.

Величина параметров K_n и α для угленосных и углевмещающих отложений одного типа может быть принята равной 1 [100]. Параметр β зависит от структуры порового пространства и для уплотненных несвязных грунтов изменяется в диапазоне $\beta = 1,3–2,2$; параметр γ определяется степенью смачиваемости поверхности твердой фазы и изменяется в диапазоне $\gamma = 1,8–3,5$.

Диапазоны значений параметров β и γ , получены путем обратных расче-

тов с использованием банка экспериментальных данных ρ_k/ρ_v , а также усредненных значений физико-технических параметров m и W для основных видов глинистых грунтов Кузбасса [101].

Таблица 2.1.

Прогнозные значения структурных параметров β и γ

Вид грунта		Параметр β								
		Супеси ($m = 0,314$; $W = 0,187$)			Суглинки ($m = 0,296$; $W = 0,227$)			Глины ($m = 0,324$; $W = 0,189$)		
Параметр γ		1,8	2,2	2,6	1,8	2,2	2,6	1,8	2,2	2,6
ρ_k/ρ_v	10,0	0,59	1,15	1,72	0,30	0,79	1,27	0,62	1,21	1,80
	5,0	1,18	1,74	2,32	0,87	1,36	1,84	1,23	1,82	2,41
	2,0	1,96	2,51	3,13	1,62	2,11	2,60	2,05	2,64	3,23
	1,5	2,20	2,77	3,34	1,69	2,35	2,83	2,30	2,89	3,84
	1,2	2,40	2,95	3,53	2,04	2,53	3,02	2,50	3,09	4,46

Для оценки содержания загрязнителя в поровой жидкости целесообразно использовать теоретическую зависимость гармонического средневзвешенного для двухкомпонентной среды, что позволит с большой достоверностью рассчитать искомую величину [102]:

$$\rho_v^{-1} = \sum_{i=1}^n V_i \cdot \rho_i^{-1} = V_{\text{э}} \cdot \rho_{\text{э}}^{-1} + V_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{н}}^{-1} \quad (2.2)$$

где ρ_v , $\rho_{\text{н}}$, $\rho_{\text{э}}$ – УЭС средневзвешенного, нефтепродукта и электролита соответственно, Ом·м; $V_{\text{н}}$, $V_{\text{э}}$ – объем в растворе соответственно нефтепродукта и электролита.

Теоретические зависимости (2.1) и (2.2) принципиально позволяют оценивать степень загрязнения грунта нефтепродуктами по результатам единичных замеров, продольных и площадных электрических зондирований [103].

Для дальнейшего анализа процесса электрохимической обработки загрязненных грунтов необходимы сведения о электрофизических свойствах природных водных растворов и жидкостей, содержащих загрязняющие вещества и насыщающих грунты. Проведены экспериментальные исследования электрических свойств растворов электролитов, содержащих нефтепродукты, с измере-

нием на постоянном и переменном электрическом токе [115].

На рис. 2.1. представлены результаты измерений УЭС ρ_z раствора NaCl в зависимости от концентрации соли в растворе и частоты переменного тока, а на рис. 2.2 – аналогичные зависимости УЭС ρ_H автомобильных масел и бензина.

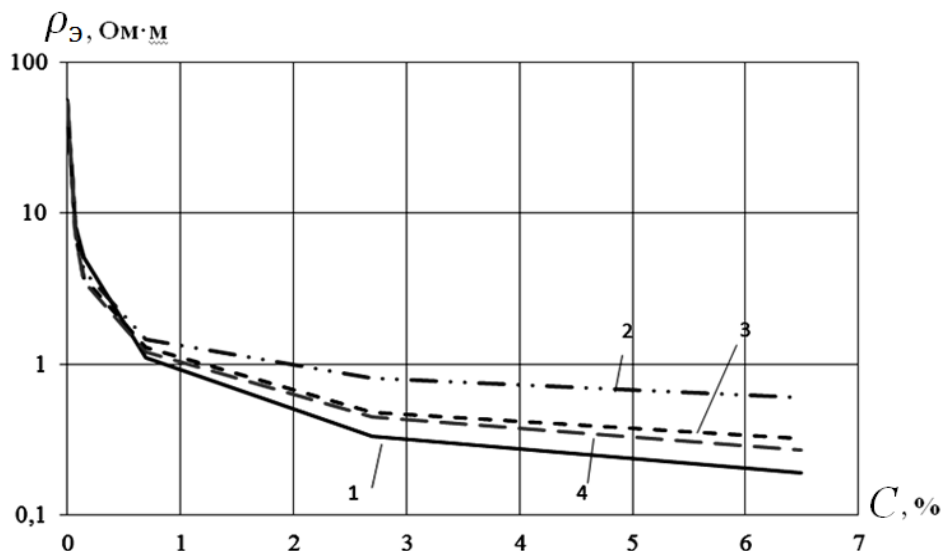


Рис. 2.1. Зависимость УЭС раствора ρ_z от концентрации соли C в растворе:
1 – постоянный ток; 2 – переменный ток, $f=10$ Гц; 3 – 200 Гц; 4 – 1000 Гц

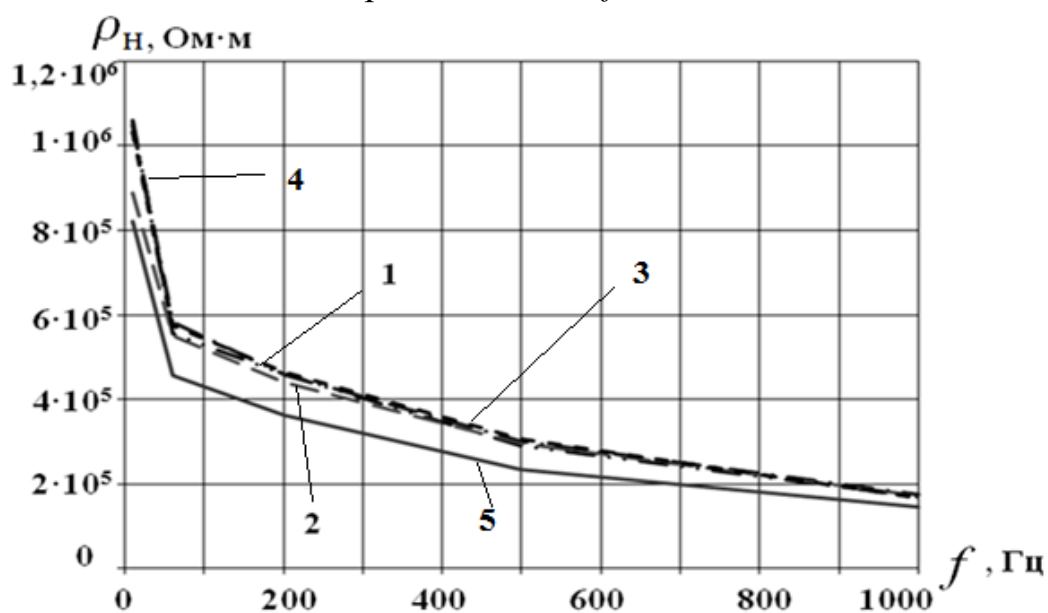


Рис. 2.2. Зависимость УЭС ρ_H моторных масел и бензина от частоты переменного тока:

1 - G-Energy F Synth 0W-40; 2 - Mobil Synt S 5W-40; 3 - Shell Helix Ultra (отработанное); 4 - Shell Helix Ultra; 5 - бензин АИ-92

Из приведенных данных следует, что все нефтепродукты электрически весьма контрастны, т.к. их УЭС не менее чем на 3 порядка превышает УЭС

природных водных растворов.

Подстановкой в уравнение (2.2) данных рис. 2.1 и рис. 2.2 получены зависимости средних значений ρ_v от относительного содержания нефтепродуктов V_H/V_3 для постоянного (рис. 2.3) и переменного (рис. 2.4) токов.

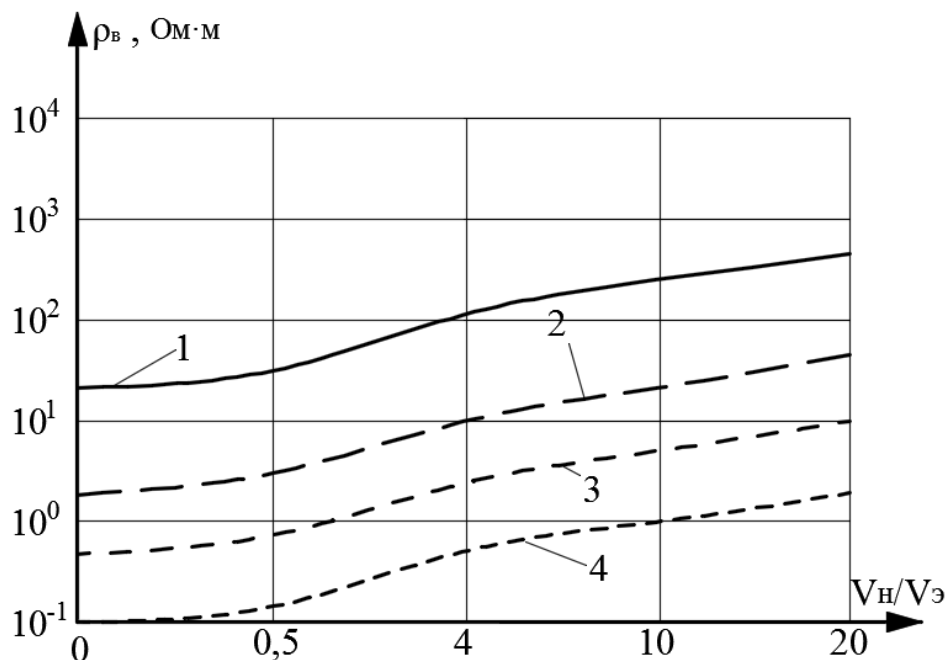


Рис. 2.3. Зависимость средних значений ρ_v от относительного содержания нефтепродуктов при измерении на постоянном токе:

1 - концентрация соли в растворе $C=0,1$ г/л; 2 - $C=0,5$ г/л; 3 - $C=2$ г/л; 4 - $C=10$ г/л

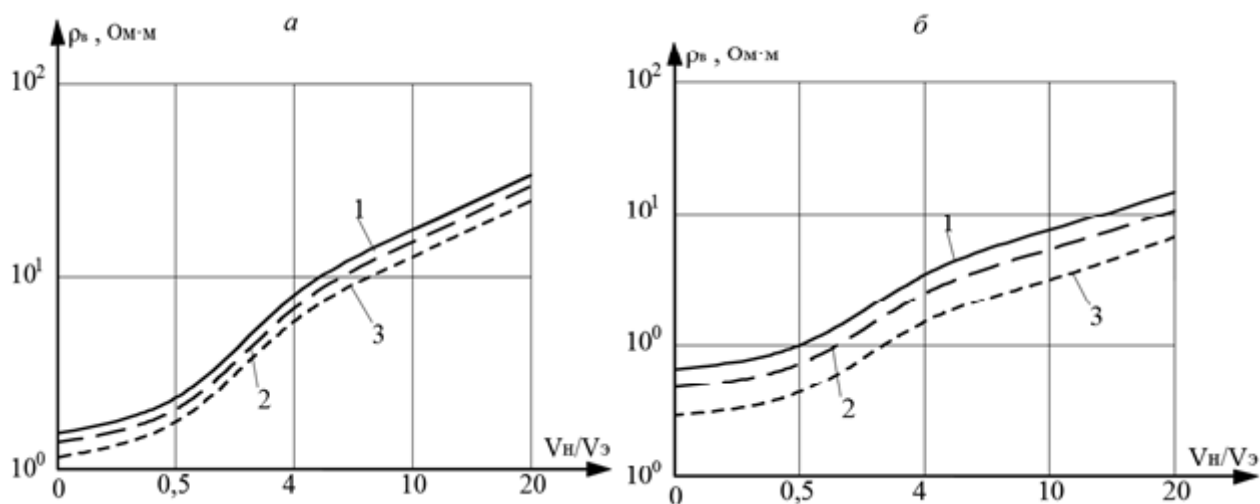


Рис. 2.4. Зависимость средних УЭС от частоты переменного тока и концентрации соли в электролите $C=0,5$ г/л (а); 10 г/л (б):

1 - $f=10$ Гц; 2 - 200 Гц; 3 - 1000 Гц

С учетом диапазонов структурных параметров β и γ , приведенных в

табл. 2.1, рассчитаны зависимости изменения эффективного УЭС основных глинистых грунтов четвертичных отложений Кузбасса, частично представленные на рис. 2.5.

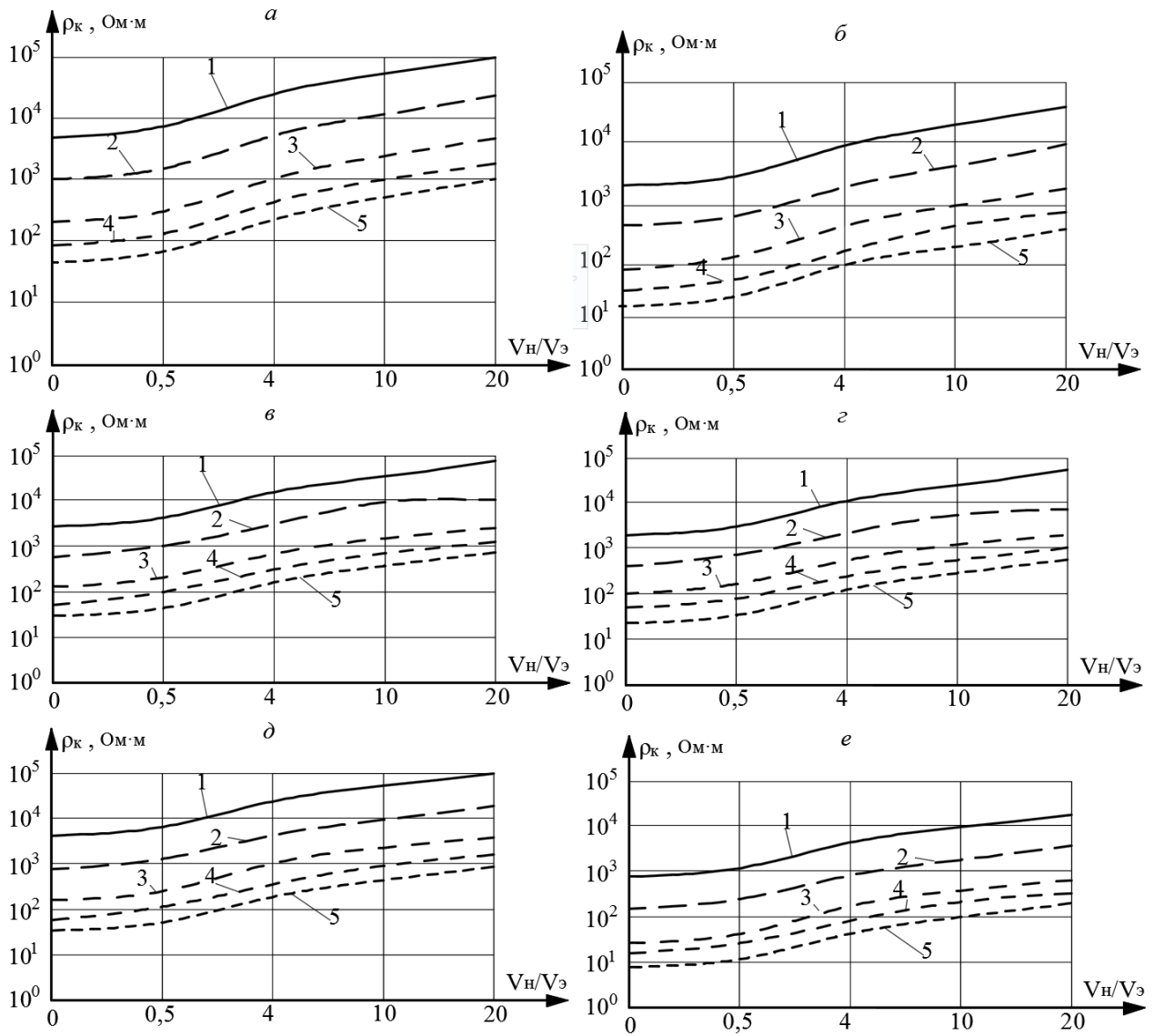


Рис. 2.5. Зависимости эффективного УЭС ρ_k грунтов Кузбасса от коэффициента влагонасыщения пространства пор и трещин W , относительного содержания нефтепродукта в средневзвешенном V_n/V_ε и концентрации соли в электролите C , г/л: супесей – $C=0,5$ (а), $C=10$ (б); суглинков – $C=0,5$ (в), $C=10$ (г); глин – $C=0,5$ (д), $C=10$ (е):
1 – $W = 0,1$; 2 – $W = 0,2$; 3 – $W = 0,4$; 4 – $W = 0,6$; 5 – $W = 0,8$

Приведенные зависимости позволили сформировать базу данных для интерпретации результатов экспериментальных зондирований при контроле изменения отношения V_n/V_ε по величине ρ_k [104].

2.2. Разработка алгоритмов и компьютерных программ для расчета локального и интегрального показателей загрязнения грунта нефтепродуктами

Для количественной оценки степени насыщения загрязнителем введен коэффициент загрязнения грунта k , равный отношению объема содержащегося в порах грунта нефтепродукта к общему объему поровой жидкости. Путем преобразований уравнений (2.1) и (2.2) можно получить следующее выражение:

$$V_H = \frac{\rho_H - \frac{\alpha k_n \rho_{\text{Э}} \rho_H}{\rho_k m^\beta W^\gamma}}{\rho_H - \rho_{\text{Э}}} \approx 1 - \frac{\alpha k_n \rho_{\text{Э}}}{\rho_k m^\beta W^\gamma}, \quad (2.3)$$

где V_H – объем заполнения пор нефтепродуктом;

$$k = m \cdot V_H, \quad (2.4)$$

где k – коэффициент загрязнения.

Теоретическая зависимость (2.3) позволяет оценивать степень загрязнения грунта нефтепродуктами по результатам единичных замеров, профильных и площадных электрических зондирований с использованием циклических алгоритмов, которые реализованы в комплексе программ, созданных в программном продукте Lazarus (среда Free Pascal) [117, 118].

На рис. 2.6 представлен алгоритм (блок-схема) расчета локального показателя загрязнения грунта.

Алгоритм можно условно разбить на несколько блоков. В первом блоке на основе измеренного УЭС пробы жидкости $\rho_{\text{вн}}$, используя зависимость (2.1), с учетом справочных данных и результатов предварительного эксперимента определяют оптимальные значения структурных параметров β и γ , при которых значения, полученные расчетным путем, минимально отличаются от экспериментальных. Второй блок отвечает за расчет степени загрязнения грунта на основе полученных результатов и с использованием зависимости (2.3).

Предложенная методика позволяет:

- оперативно оценить степень загрязнения грунта нефтью или нефтепродуктами;
- обосновать рекомендации для принятия решений по выбору оптимальных параметров технологии очистки нефтезагрязненных грунтов и восстано-

лению природной среды.

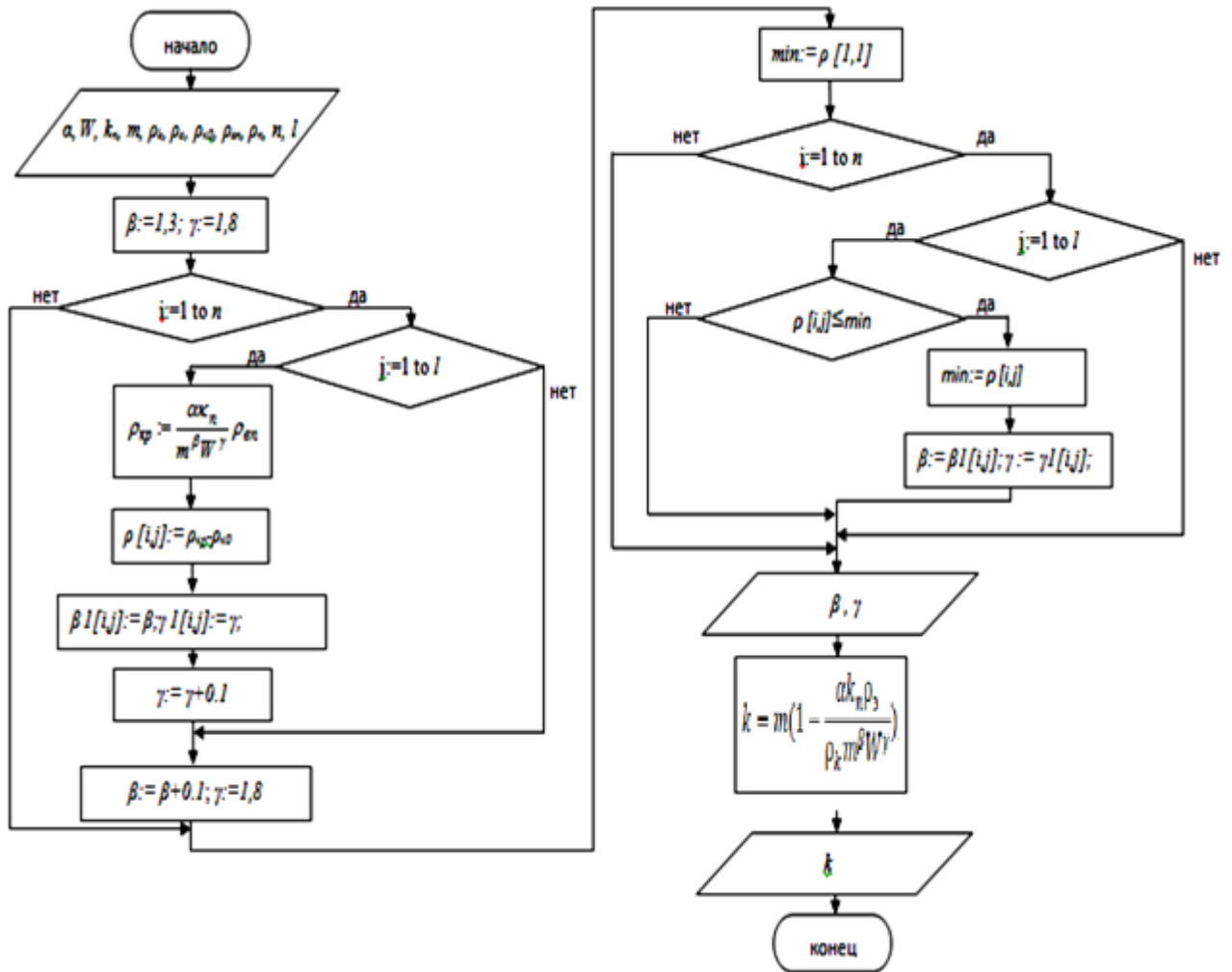


Рис. 2.6. Блок-схема расчета локального коэффициента загрязнения грунта нефтепродуктами:

$\rho_e, \rho_{k0}, \rho_n$ – УЭС соответственно электролита, грунта вне загрязненной зоны, нефтепродукта, Ом·м; n и l – задаваемое количество циклов поиска оптимальных значений β и γ ; k – коэффициент загрязнения грунта

Для усредненной оценки степени загрязнения грунта по профилю (сечению) или объему целесообразно использовать интегральный показатель, включающий банк локальных значений k_i и площади S_i (объемы V_i) загрязненных зон:

$$I_s = \frac{\sum k_i \cdot S_i}{S}, \quad I_v = \frac{\sum k_i \cdot V_i}{V}. \quad (2.5)$$

Блок-схема расчета интегральных показателей I_s , I_v представлена на рис. 2.7.

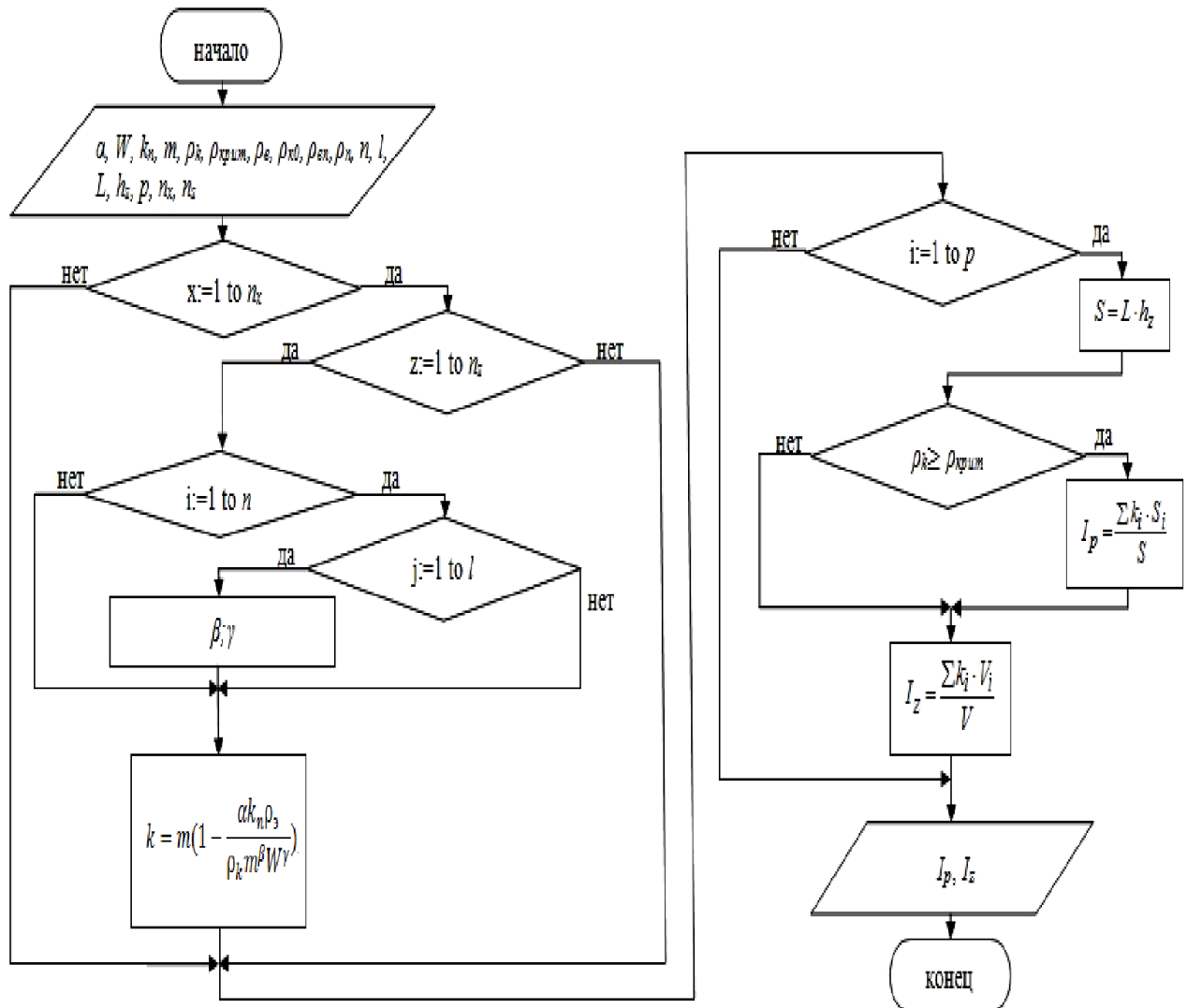


Рис. 2.7. Блок-схема расчета интегрального показателя загрязнения грунта нефтепродуктами по профилю I_s и по объему I_v :

L – длина профиля, м; h_z – глубина зондирования, м; S – площадь измеряемого профиля, $S=L \cdot h_z$, м²; p – количество контрольных профилей; $\rho_{крит}$ – критическое значение УЭС в профиле, Ом·м; n_x – количество точек замера по длине профиля; n_z – количество точек замера по глубине профиля

Геометрические параметры зоны загрязнения, используемые в алгоритме, приведены на рис. 2.8.

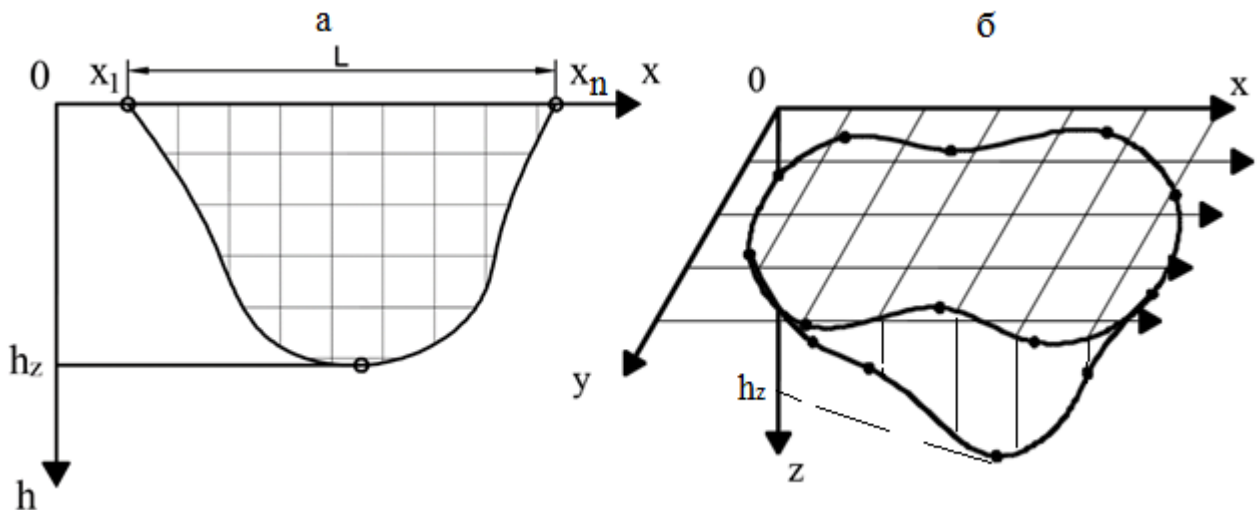


Рис. 2.8. Геометрические параметры зоны загрязнения, используемые для расчета интегральных показателей I_s (а) и I_v (б)

Тексты компьютерных программ приведены в Приложениях А, Б.

2.3. Экспериментальная проверка расчетных зависимостей

Для проверки теоретических зависимостей, использованных при расчете коэффициента загрязнения k , был проведен эксперимент на образцах искусственно загрязненных грунтов.

Образцы загрязненного грунта получали путем смешивания миксером чистого грунта с фиксированным количеством машинного масла. Для искусственно загрязненных образцов грунта в ходе эксперимента определяли пористость, влажность, УЭС грунта ρ_k , электролита ρ_e и поровой жидкости ρ_n , а также коэффициент загрязнения грунта k с помощью специально разработанного программного комплекса, обеспечивающего циклический подбор оптимальных значений постоянных β и γ .

В ходе эксперимента с искусственно загрязненными образцами, начиная с образца № 7, наблюдалось частичное нарушение структурных связей образца. С увеличением концентрации нефтепродукта при $k > 30\%$ происходило изменение фазового состояния образца: переход его из твердого связного в пластичную несвязную суспензию, что способствовало резкому росту УЭС образца ($\rho_k \rightarrow \rho_n$). Область применения предложенного метода контроля ограничивается $k < 20\%$, при этом погрешность оценки не превышает 23% (табл. 2.2).

В графической форме результаты эксперимента представлены на рис. 2.9.

Таблица 2.2

Физико-технические характеристики грунта в опытных образцах
(масса грунта $m_g = 200$ г, масса воды $m_w = 20$ г, влажность $W = 22$ %)

Характеристика	№ образца									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Масса масла, г	0	2	4	10	15	20	30	40	50	60
УЭС грунта, ρ_k , Ом·м	13,75	17,5	21,25	23,75	22,5	25,0	26,25	42,5	950,0	1150,0
Пористость, m , %	38,8	40,7	42,5	48,1	52,7	57,4	66,7	76,0	85,3	94,6
k , %	0	1,0	1,8	4,35	6,4	8,3	12,0	15,4	18,5	21,4

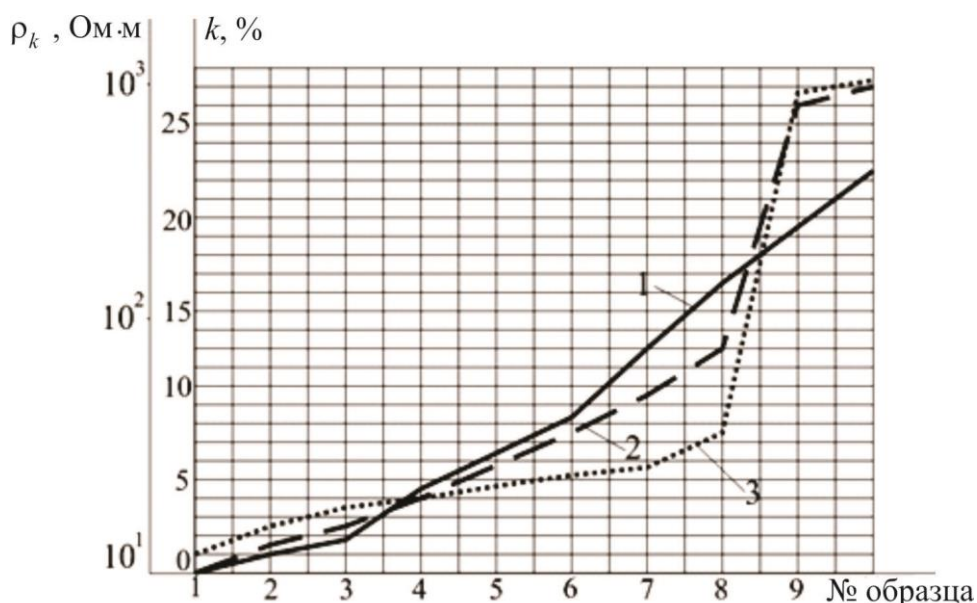


Рис. 2.9. Результаты экспериментального определения и программного расчета коэффициента загрязнения в образцах грунта:

1 – коэффициент k , полученный экспериментальным путем; 2 – расчетный коэффициент; 3 – сопротивление ρ_k грунта в образцах

Для геофизического экспресс-прогноза можно подобрать регрессионную зависимость, достаточно точно описывающую характер изменения коэффициента загрязнения k по мере увеличения концентрации нефтепродукта в грунте и соответствующего относительного увеличения УЭС ρ_k . В табл. 2.3 и на рис. 2.10 приведены результаты статистической обработки - уравнения регрессии и соответствующие расчетные показатели: корреляционное отношение (коэффициент корреляции) R ; критерий Фишера, F ; критическое значение критерия Фишера, $F_{кр}$. Наибольшую точность обеспечивает полиномиальная зависимость ($R = 0,981$).

Таблица 2.3

Зависимость коэффициента загрязнения k от относительного изменения
УЭС грунта в образце

Уравнение	Критерий Фишера		
	R	$F_{кр}$	F
1. Линейная $k = 9,49 \frac{\rho_k}{\rho_{k0}} - 10,61$	0,900	7,709	17,356
2. Логарифмическая $k = 12,52 \ln(\frac{\rho_k}{\rho_{k0}}) - 1,19$	0,867	7,709	12,287
3. Полиномиальная $k = 18,57(\frac{\rho_k}{\rho_{k0}})^2 - 42,7257 \frac{\rho_k}{\rho_{k0}} + 24,44$	0,981	9,552	81,746
4. Степенная $k = 0,19(\frac{\rho_k}{\rho_{k0}})^{6,1022}$	0,977	7,709	93,087

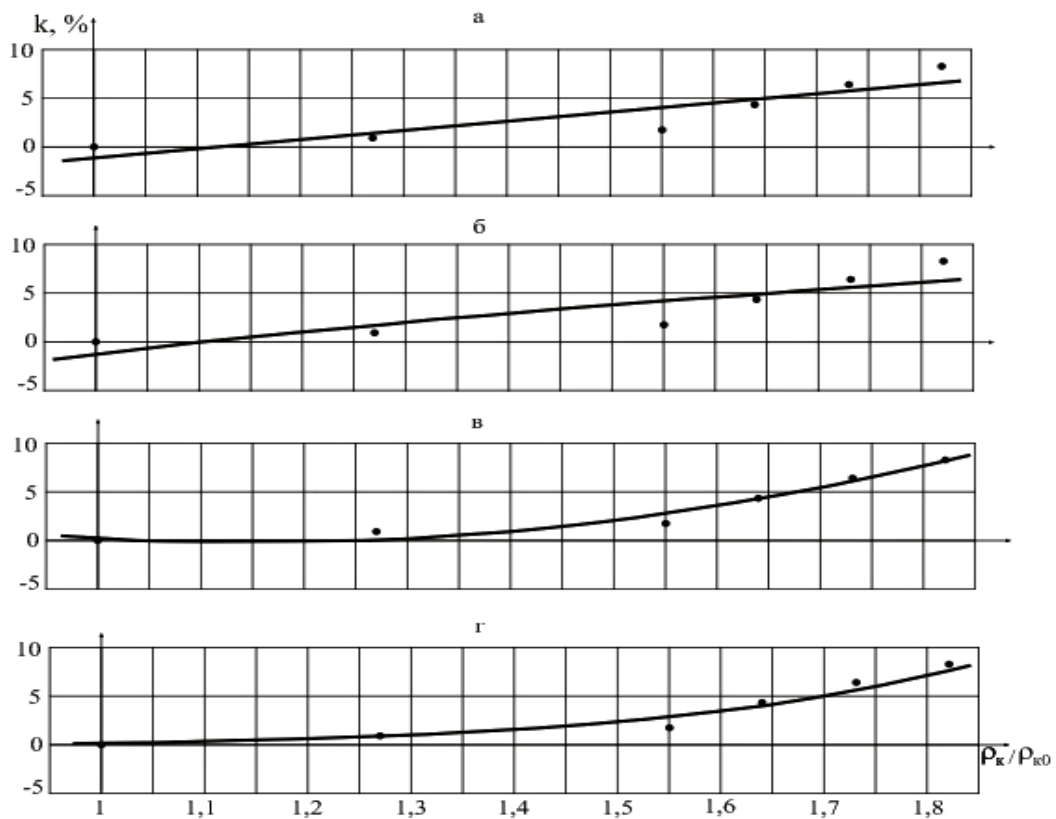


Рис. 2.10. Результаты статистической обработки экспериментальной зависимости коэффициента загрязнения от соотношения электросопротивлений ρ_k/ρ_{k0} грунта в образце; линейная (а); логарифмическая (б); полиномиальная (в); степенная (г)

Программный расчет позволил оценить изменения структурного параметра β по мере увеличения концентрации загрязнителя в грунте (рис. 2.11). Из графика следует, что для области, соответствующей фазовому переходу

($\rho_k/\rho_3 > 190$), значения структурного показателя β следует дополнительно корректировать по отношению к значениям, приведенным в табл.2.1.

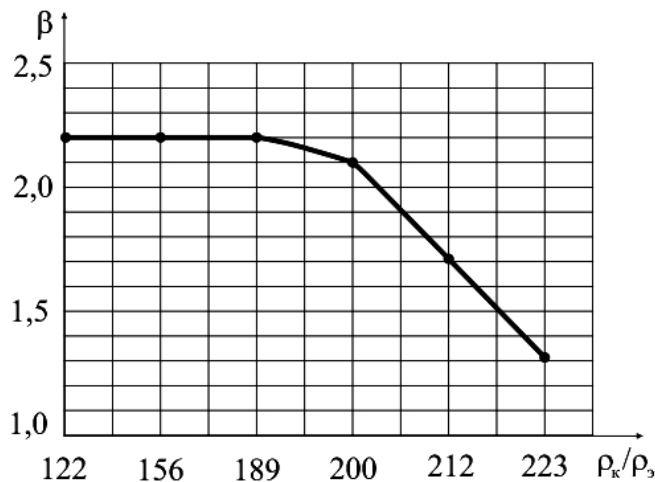


Рис. 2.11. Зависимость структурного показателя β от относительного УЭС грунта в образце

Результаты лабораторного эксперимента позволили установить следующее:

- метод электросопротивлений эффективен для оперативной оценки степени загрязнения грунта нефтепродуктами при их содержании до 15-20%, после чего происходит разрушение структурных связей грунта;

- для расчета коэффициента загрязнения k целесообразно использовать классические эмпирические зависимости электроразведки для УЭС трехфазной среды, реализованные в форме циклических алгоритмов путем оптимизации основных структурных параметров и их корректирования для области фазового перехода.

- для приближенной оценки степени загрязнения наиболее подходящей является полиномиальная зависимость k от величины относительного УЭС.

Выводы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию способов электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами позволили сделать следующие выводы.

1. Для контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами целесообразно использовать зависимость УЭС трехфазной среды от пористости, влажности и УЭС порового заполнителя, используемую в электроразведке и включающую структурно-текстурные эмпирические параметры. При этом диапазоны изменения параметров структуры порового пространства $\beta = 1,3-2,2$ и смачиваемости $\gamma = 1,8-3,3$ следует принимать для условий Кузбасса по ранее установленным экспериментальным данным, а УЭС порового заполнителя рассчитывать по формуле гармонического средневзвешенного для двухкомпонентной среды.

Экспериментально установлено, что с изменением концентрации водного раствора соли до 6,5 % величина УЭС уменьшается от 80 до 0,2 Ом·м, а УЭС моторных масел и бензина в диапазоне частот $f = 0-1$ кГц изменяется в диапазоне $(0,2-1,1) \cdot 10^6$ Ом·м. С использованием экспериментальных и теоретических зависимостей получены расчетные базы данных УЭС заполнителя пор и эффективного УЭС трехкомпонентной среды для указанных диапазонов концентраций водных растворов, частот и соотношения объемных долей нефтепродукта и электролита $V_n/V_v = 0-20$.

2. Для автоматизации расчета локального коэффициента загрязнения k грунта по экспериментальным данным электрических зондирований разработан алгоритм, включающий подбор оптимальных величин структурных параметров β и γ по критерию минимального отклонения расчетного значения эффективного УЭС от измеренного и расчет значений k по отношению значений эффективных УЭС в пределах зоны загрязнения и вне ее.

Для повышения точности оценки степени загрязнения предложены интегральные параметры I_s и I_v , включающие суммирование произведений локальных значений k и элементарных площадей или объемов, на которые зона загрязнения разбивается с заданным шагом.

Алгоритмы реализованы в форме программных комплексов в среде Free Pascal (продукт Lazarus), прошедших государственную регистрацию [112, 113].

3. Для экспериментальной проверки точности расчетных зависимостей и компьютерной программы было проведено сопоставление коэффициентов загрязнения грунта, с которым был перемешан фиксированный объем отработанного масла при известной влажности и пористости. Эксперимент показал, что в

диапазоне $k < 20\%$ погрешность оценки не превышала 23 %. При $k > 30\%$ образец грунта переходил из связного состояния в пластичную несвязную суспензию, вследствие чего величина ρ_k и погрешность прогноза резко возрастала. Установлено также, что для повышения точности расчета следует корректировать величину структурного параметра β по установленной нелинейной зависимости при $\rho_k/\rho_s > 190$.

Для экспресс-анализа при полевых исследованиях можно использовать регрессионные зависимости величин k от относительной величины ρ_k/ρ_{k0} , при этом корреляционное отношение $R > 0,9$ имеют полиномиальная, степенная и линейная зависимости.

Полученные теоретические и экспериментальные зависимости электропроводящих свойств пористых влагонасыщенных грунтов от содержания нефтепродуктов в порах, разработанные алгоритмы и компьютерные программы для обработки результатов геофизических измерений позволили перейти к исследованию закономерностей изменения физических свойств загрязненных грунтов в зоне электрообработки.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ ИХ ОТ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Комплекс лабораторных исследований включал следующие эксперименты:

- моделирование процесса электрохимической обработки на одномерной модели;
- моделирование процесса электрохимической обработки на трехмерной модели;
- испытание метода контролируемой электрохимической очистки грунтов от нефтезагрязнений в натуральных условиях на опытном полигоне.

3.1. Лабораторные исследования процессов электрохимической обработки грунтов на одномерной модели

Для изучения закономерностей изменения физических свойств грунтов при электрохимической очистке от нефтезагрязнений в лаборатории КузГТУ были проведены исследования на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 3.1.

Физическая модель представляла собой участок зоны электрохимической очистки цилиндрической формы с расстоянием между электродами в горизонтальном направлении, близким к реальному, $l = 0,3$ м. В качестве исследуемой среды применялся уплотненный суглинок, смешанный с помощью миксера с нефтепродуктом.

Емкость для помещения грунта представляла собой трубу из непроводящего материала (полиэтилена), наружный диаметр трубы 160 мм, внутренний 140 мм. К торцам трубы прикреплены пластины из оцинкованной стали толщиной 0,7 мм, пластины подрезаны по сечению трубы. В нижней части трубы вблизи электродов 5, 6 предусмотрены дренажные отверстия 11. В грунт перед загрузкой для повышения плотности тока было добавлено 800 г воды, 8 г соли поваренной NaCl (1%).

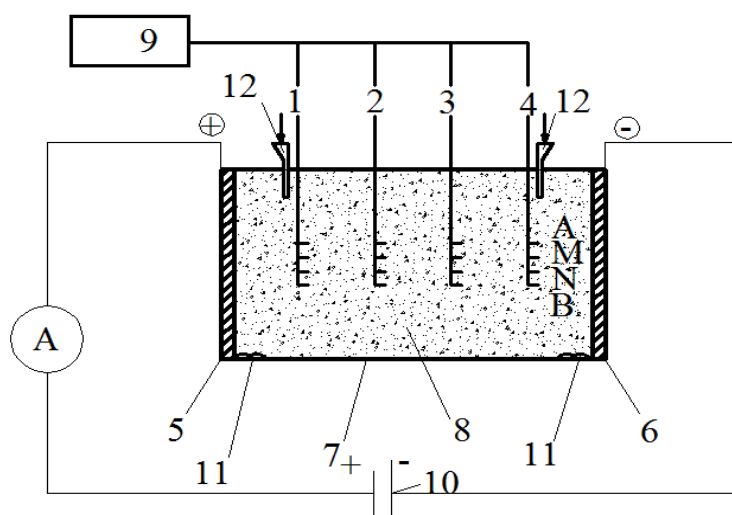


Рис.3.1. Схема экспериментальной установки: 1–4 – четырехэлектродные датчики-зонды №1–4; 5 – положительный электрод (анод); 6 – отрицательный электрод (катод); 7 – полиэтиленовая труба $\varnothing 160$ мм; 8 – обрабатываемый загрязненный грунт; 9 – каротажный прибор КП-2; 10 – источник постоянного напряжения $U=16$ В; 11 – дренажные отверстия; А, М, N, В – медные микроэлектроды; 12 – отверстия для подачи гексана

Методика эксперимента включала измерение удельного электросопротивления (УЭС) загрязненного грунта с помощью датчиков-зондов, изготовленных из четырехжильного медного кабеля. Датчики-микрозонды с расстоянием между контактами $AM = MN = NB = 10$ мм погружены в грунт через отверстия в трубе на глубину 70 мм. Измерительным прибором является каротажный прибор КП-2, реализующий измерения УЭС на постоянном токе в импульсном режиме с автоматической компенсацией поляризации, разработанный в КузГТУ. Остальные электрические характеристики грунта и установки измерены электронным мультиметром МУ64. Электрическое поле в модели создавалось стабилизированным блоком питания с напряжением $U = 12\text{--}16$ В.

Физико-механические характеристики грунта определены с помощью следующих приборов и принадлежностей полевой лаборатории ПЛЛ-2: набор бюкс для определения влажности, весы электронные, духовой шкаф, набор сит.

Основными задачами экспериментальных исследований были следующие: установление влияния нагревания массива электрическим током на разложение органических веществ; изучение физических параметров очищаемого

массива; исследование процессов электрокоагуляции, способствующих переходу нефтепродуктов в твердое состояние.

На рис. 3.2 приведены результаты измерений УЭС ρ обрабатываемого грунта в зависимости от координаты x расположения датчиков-зондов в установке с течением времени.

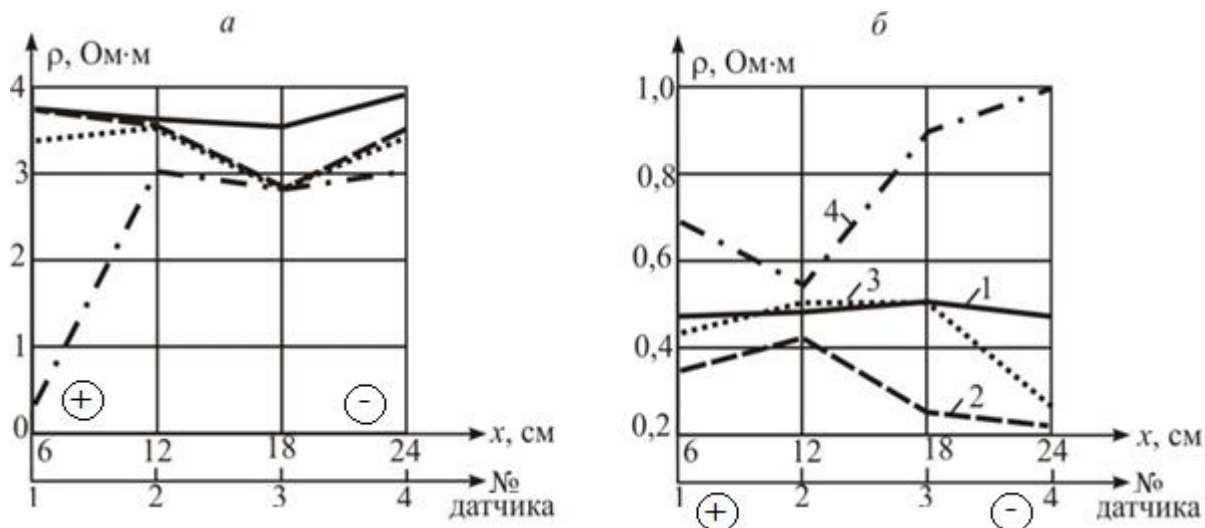


Рис.3.2. Изменение УЭС чистого грунта (а) и загрязненного маслом *Shell Helix Ultra* (б) с добавлением раствора NaCl при электрохимической обработке:
1 – начало обработки; 2 – через 1 сут; 3 – 2 сут; 4 – 6 сут

Из графиков следует, что физические процессы при электрообработке в течение 6 сут чистого и загрязненного маслом грунта принципиально отличаются: у чистого грунта происходит электроосмотическое перемещение влаги в область анода; в загрязненном грунте зафиксировано движение жидкости в обоих направлениях, причем нефтепродукты по порам перемещаются в сторону катода. Через дренажные отверстия наблюдались выделения накопленной жидкости: у анода с незначительными следами нефтепродуктов, у катода – с их существенным содержанием.

На рис.3.3 представлены результаты контроля относительного изменения УЭС ρ/ρ_0 по продольной оси трубы в ходе процессов электрообработки грунта и после его прекращения. Изменения основных физических параметров грунта в районе датчиков № 1 и № 4 (в зонах основного электроосмоса) приведены в табл. 3.1, а изменения гранулометрического состава – в табл. 3.2.

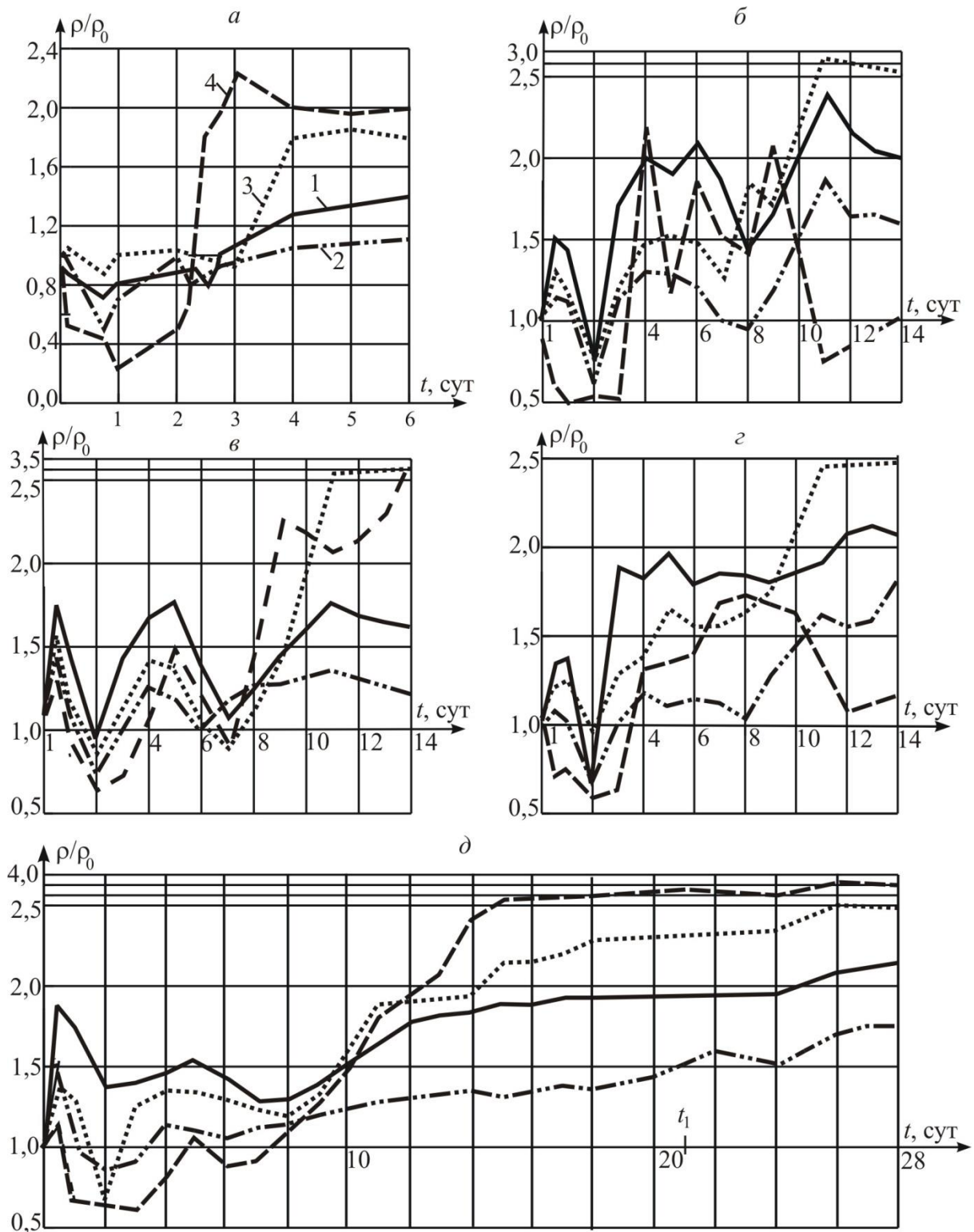


Рис.3.3. Графики изменения относительного УЭС массива при электрохимической очистке от загрязнения маслом *Shell Helix Ultra* (а); бензином (б); маслом *Shell Helix Ultra* отработанным (в); дизельным топливом (г); мазутом (д) (объем загрязнителя $V=100\text{г}$):

1 –четырёхэлектродный датчик-зонд №1; 2 – №2; 3 – №3; 4 – №4;

t_1 – момент прекращения обработки

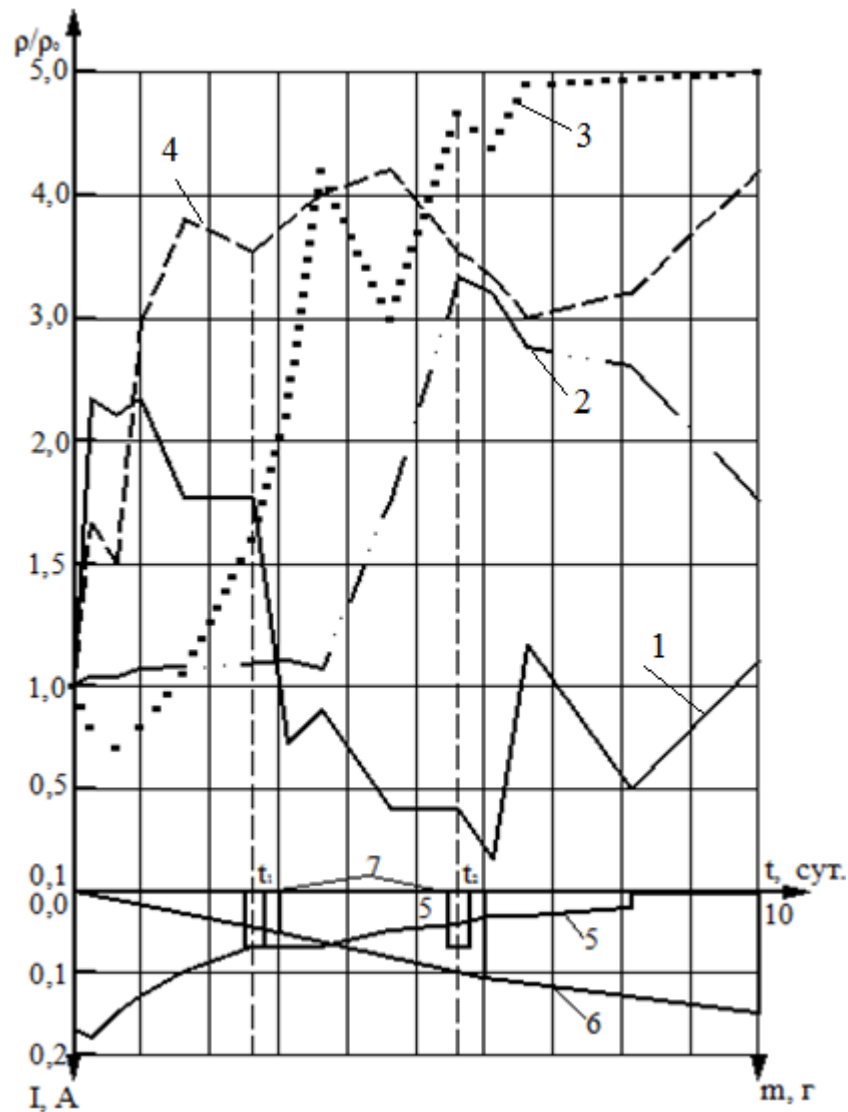


Рис.3.4. Графики изменения относительного УЭС массива, силы тока I и массы m подачи промывающей жидкости при электрохимической очистке от загрязнения маслом *Shell Helix Ultra*, (170 г) промывкой растворителем Гексан-н:

- 1 — четырехэлектродный датчик-зонд № 1; 2 — № 2; 3 — № 3; 4 — № 4; 5 — сила тока I ; 6 — масса воды, скопившейся под отрицательным электродом;
 7 — количество поданной промывающей жидкости;
 t_1, t_2 — моменты введения растворителя.

Описанные выше эксперименты характеризуют электротермическое воздействие обработки на грунтовый массив без растворения густых фракций нефтепродуктов. Проведен опыт с разжижением нефтезагрязнителя. В установку был загружен суглинок, перемешанный с водой (800г), маслом (170г) и поваренной солью (12г). В ходе эксперимента производилась обработка загряз-

ненного грунта постоянным электрическим током, и промывка грунта растворителем нефтепродуктов Гексан-н.

Промывающая жидкость подавалась в отверстие в трубе около датчика №1 в момент $t_1 = 64$ ч от начала эксперимента в объеме 100 мл (70г). Также промывающая жидкость подавалась около датчика №4 в момент $t_2 = 136$ ч от начала эксперимента в объеме 100мл (70г). За время эксперимента под отрицательным электродом скапливалась жидкость, по свойствам близкая к свойствам воды, скопление происходило равномерно в ходе всего эксперимента, объем жидкости 150 мл.

При подаче растворителя на датчик №1 жидкость распространялась в массив, при этом не стекала под электроды. При подаче на датчик №4 растворенный нефтепродукт стекал под отрицательный электрод, суммарный объем жидкости составил 20 мл (14 г).

Из графиков изменения относительного УЭС (рис.3.4) следует, что в зоне разжижения и растворения нефтепродукта происходит снижение величины УЭС. Более подробно данные результаты описаны в материалах [106,107, 116].

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- УЭС природных жидкостей и нефтесодержащих загрязнителей, насыщающих грунты, электрически контрастны и отличаются на несколько порядков в сторону загрязнителя, что позволяет с достаточной информативностью определять геометрические параметры зоны загрязненных грунтов и степень загрязнения;

- при нагревании в процессе пропускания тока и воздействии на нефтепродукты в порах грунта они переходят вследствие коагуляции в твердое связанное состояние, что приводит к увеличению УЭС грунта на всем протяжении зоны обработки при $t > 3$ сут;

- в результате электротермического воздействия постоянного тока на загрязненный массив происходит образование твердых частиц и слипание этих частиц, что приводит к изменению гранулометрического состава глинистого грунта в сторону увеличения содержания более крупных фракций;

- в приэлектродных зонах вследствие дренирования накопленной влаги влажность снижается, а увеличение процентного содержания крупных фракций

приводит к снижению плотности грунта как во влажном, так и в сухом состоянии;

- с момента начала процесса коагуляции нефтепродуктов при $t > 3$ сут процесс увеличения УЭС происходит относительно монотонно как в приэлектродных, так и в центральной переходной области при обработке грунтов, смешанных с вязкими тяжелыми жидкостями (масла, мазут), для легких фракций (бензин, дизельное топливо) характерно снижение УЭС в прикатодной зоне;

- введение в грунт растворителя способствует образованию вокруг электрода зоны разжижения, причем направление электроосмотической фильтрации соответствует преобладанию в растворителе Гексан-н положительно заряженных ионов.

Таблица 3.1

Изменение физических параметров в результате электрообработки

Рисунки, № датчика	Характеристики (до/после обработки)		
	Влажность, %	Плотность во влажном состоянии, г/см ³	Плотность в сухом состоянии, г/см ³
Рис.3.3, а, № 1	54/15	2,33/1,72	1,51/1,49
Рис.3.3, б, № 1	17,3/12,2	1,80/1,66	1,53/1,48
Рис.3.3, в, № 1	15,9/9,3	1,81/1,61	1,56/1,47
Рис.3.3, г, № 1	19/16	1,81/1,74	1,52/1,50
Рис.3.3, д, № 1	20/13	1,87/1,66	1,56/1,47
Рис.3.3, а, № 4	54/52	2,33/2,3	1,51/1,51
Рис.3.3, б, № 4	17,3/16,0	1,80/1,74	1,53/1,5
Рис.3.3, в, № 4	15,9/7,5	1,81/1,62	1,56/1,51
Рис.3.4, №1	33/18	2,04/1,92	1,53/1,63
Рис.3.4, №4	33/14,3	2,04/1,64	1,53/1,43

Таблица 3.2

Изменение гранулометрического состава грунта в результате электрообработки

Рис., № датчика	Содержание фракций (мм), % (до/после обработки)				
	2	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Рис.3.3, а, № 1	0,9/3,6	22,3/30,4	12,2/14,6	14/30,6	50,6/20,75
Рис.3.3, б, № 1	1,2/4,0	19,3/32,3	13,5/16,8	16,6/25,4	49,4/21,5
Рис.3.3, в, № 1	2,0/2,1	17,6/21,2	15,5/22,3	18,8/28,9	46,1/25,5
Рис.3.3, г, № 1	1,4/2,0	19,8/31,1	13,9/15,7	16,1/28,8	48,8/22,4
Рис.3.3, д, № 1	2,5/2,8	18,9/22,3	15,5/23,2	19,8/27,8	43,3/23,9
Рис.3.3, а, № 4	1,2/1,5	19,3/20,1	13,5/14,0	16,6/17,0	49,4/47,6
Рис.3.3, б, № 4	2,0/4,0	17,6/20,1	15,5/20,8	18,8/23,6	46,1/31,5
Рис.3.3, в, № 4	7,7/10,6	33,4/40,3	15,1/15,1	18,6/15,3	25,2/18,7
Рис.3.4, №1	7,7/20,7	33,4/39,1	15,1/13,1	18,6/24,1	25,2/3,0

3.2. Лабораторные исследования процессов электрохимической обработки грунтов на объемной модели

Объемная (трехмерная) физическая модель представляла собой участок зоны электрохимической очистки с реальными поперечными размерами электродов и расстоянием между ними в горизонтальном сечении (рис. 3.5).

В качестве исследуемой среды применялся уплотненный суглинок, смешанный с помощью миксера с нефтепродуктом. Концентрация нефтезагрязнителя соответствовала практически возможной при постепенном периодическом загрязнении или при разливе нефти в результате аварии. Таким образом, все физические параметры модели не отличались от соответствующих параметров природы.

Емкость с размерами 1000×500×360 мм изготовлена из непроводящего электрический ток материала (ламинированной влагостойкой фанеры), гидроизолирована полиэтиленовой пленкой и заполнена суглинком. В грунт на глубину 300 мм погружены электроды-инъекторы – перфорированные стальные электросварные трубы с внутренним диаметром 51 мм, заглушенные внизу деревянной заглушкой (рис. 3.6).

Методика эксперимента включала измерение истинного УЭС загрязненного грунта с помощью описанных выше датчиков-микрозондов, погруженных в грунт на глубину 180 мм. Общее количество датчиков – 22. Электрическое поле в модели создавалось стабилизированным блоком питания Б5-50 с напряжением $U = 50\text{--}300\text{ В}$, при силе тока до 0,6 А.

Физическое моделирование процессов электрохимической обработки грунтов на объемной модели производилось в две стадии.

На первой стадии эксперимента была произведена параллельная обработка грунта в двух емкостях. В первую был загружен чистый суглинок массой 260 кг, перемешанный с водой (52 кг), а во вторую был загружен суглинок массой 250 кг, перемешанный с водой (47 кг) и отработанным маслом – нефтезагрязнителем (8,1 кг).

Графики изменения относительного УЭС по основной оси электрообработки на различных ее стадиях приведены на рис. 3.7 и 3.8.

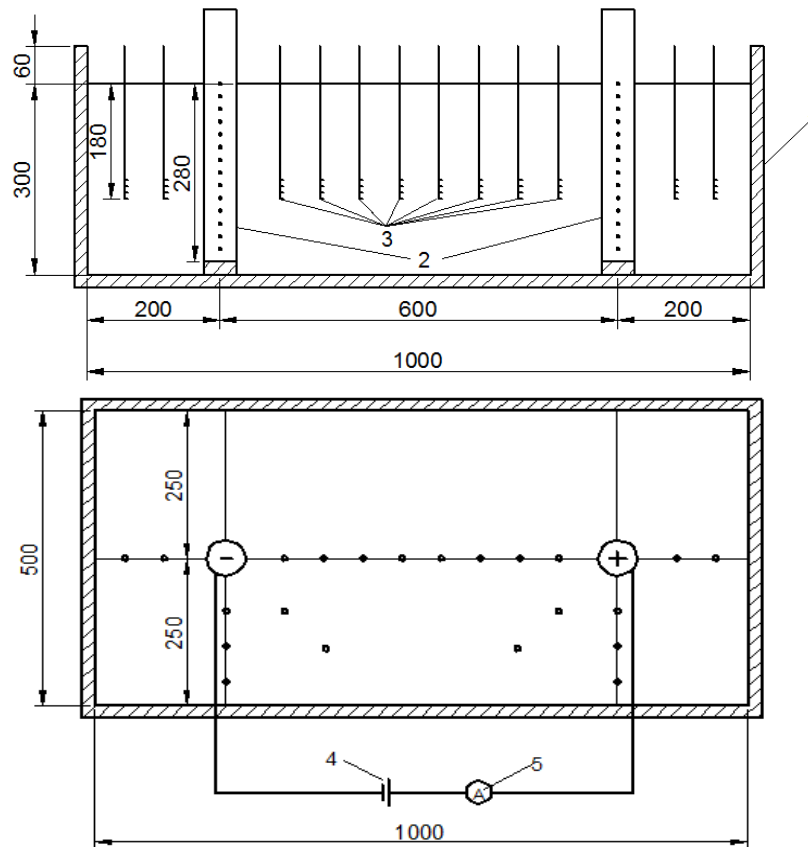


Рис. 3.5. Схема экспериментальной трехмерной модельной установки:
 1 – емкость (ванна); 2 – электроды-инъекторы; 3 – датчики-микрозонды;
 4 – питающая установка (два последовательно включенных источника питания
 постоянного электрического тока Б5-50); 5 – амперметр

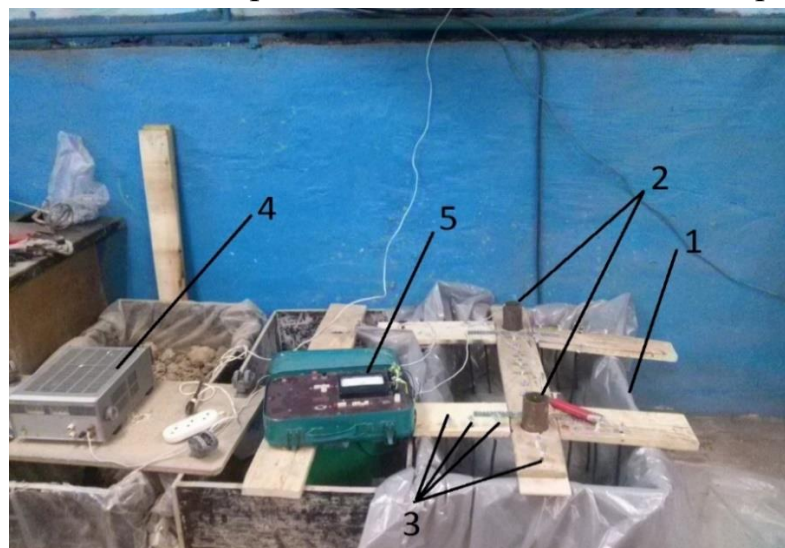


Рис. 3.6. Экспериментальная установка:
 1 – емкость (ванна); 2 – электроды-инъекторы; 3 – датчики-микрозонды;
 4 – питающая установка - источник питания постоянного электрического тока
 Б5-50; 5 – каротажный прибор КП-2

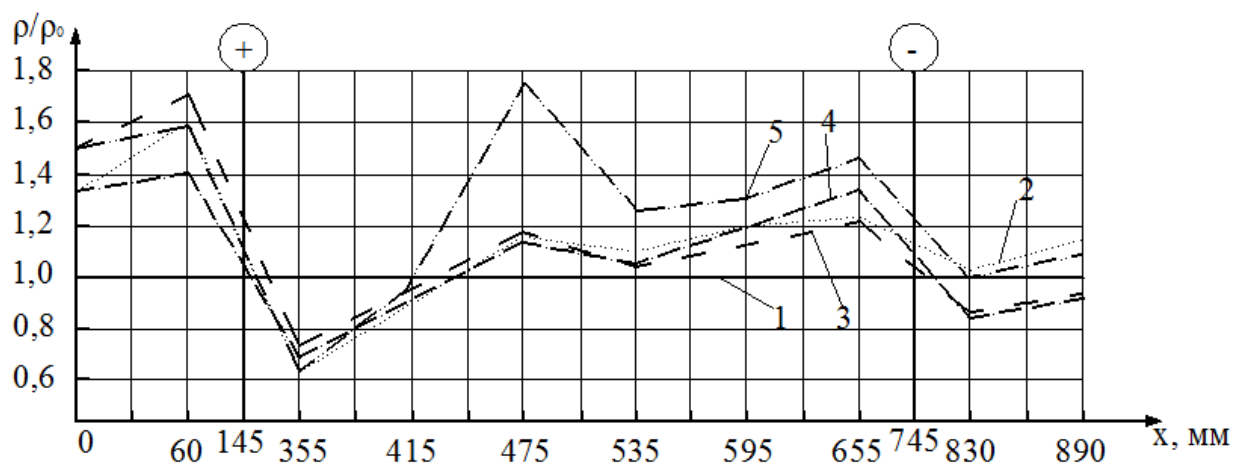


Рис. 3.7. Изменение УЭС чистого грунта при электрообработке:
1 – начало обработки; 2 – токорасход $I \cdot t = 3,6 \text{ А} \cdot \text{ч}$; 3 – $6 \text{ А} \cdot \text{ч}$; 4 – $13,5 \text{ А} \cdot \text{ч}$;
5 – $22,5 \text{ А} \cdot \text{ч}$

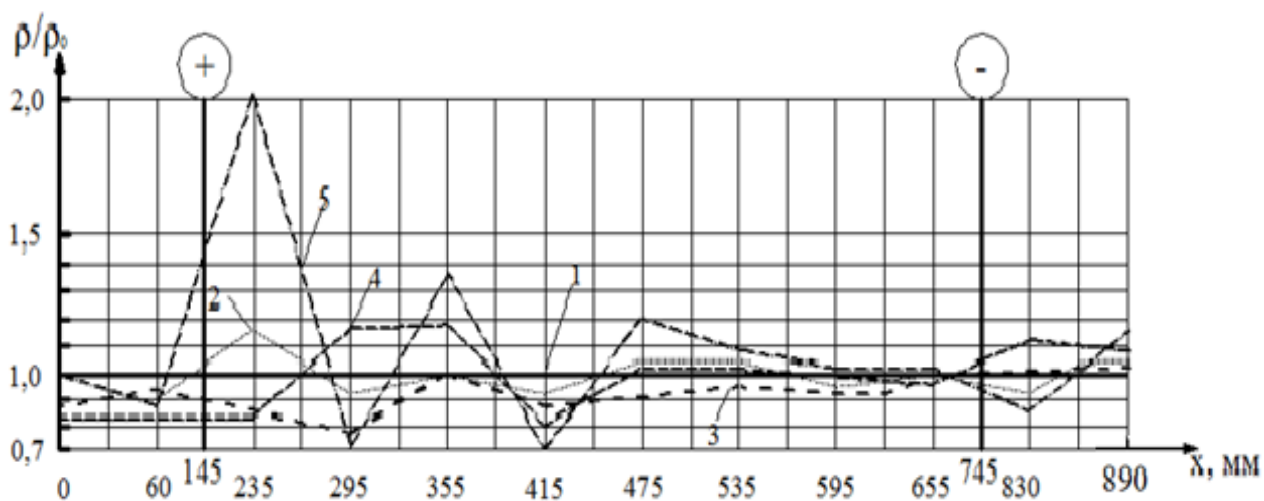


Рис. 3.8. Изменение УЭС загрязненного отработанным маслом *ShellHelixUltra* грунта при электрохимической обработке:
1 – начало обработки; 2 – токорасход $I \cdot t = 10 \text{ А} \cdot \text{ч}$; 3 – $30,3 \text{ А} \cdot \text{ч}$; 4 – $50,7 \text{ А} \cdot \text{ч}$;
5 – $65,1 \text{ А} \cdot \text{ч}$

Из приведенных результатов эксперимента следует, что электроосмотические процессы в приэлектродных областях при обработке чистого и загрязненного нефтепродуктом грунта взаимосвязаны и имеют при этом существенные отличия, обусловленные различием электропроводящих свойств водного раствора (низкое УЭС) и машинного масла (диэлектрик):

- у чистого грунта (рис. 3.7) происходит поступательное перемещение влаги от катода к аноду, сопровождающееся снижением УЭС в зоне скопления

влаги и увеличением УЭС в зоне электроосушения, при этом прианодная зона осушения по протяженности превышает зону влагонасыщения, формирование указанных зон происходит достаточно быстро, через 30-35 А·ч с момента начала электрообработки;

- в загрязненном грунте (рис. 3.8) зафиксирован волнообразный характер изменения УЭС, связанный с тем, что вязкость нефтепродукта значительно выше, чем водного раствора; при этом положительные пики УЭС, соответствующие преобладанию в порах нефтепродукта, и отрицательные, соответствующие преобладанию водного раствора, в ходе обработки становятся более контрастными и перемещаются в зону анода; в катодной области при оттоке влаги УЭС меняется незначительно, что указывает на преобладающее влияние изоляции минеральных зерен грунта масляной пленкой.

Гидродинамические процессы в приэлектродных областях характеризуются круговыми диаграммами УЭС, приведенными на рис. 3.9 и 3.10.

Установлены следующие особенности формирования приэлектродных объемных зон: $I \cdot t, \text{А} \cdot \text{ч}$:

- вокруг анода в чистом грунте наблюдается асимметрия УЭС, зона скопления влаги с $\rho/\rho_0=0,6-0,7$ соответствует круговому сектору в диапазоне $\Delta\varphi = 90 - 120^\circ$, с бокового и обратного направления зафиксирован отток жидкости; непосредственно вблизи электрода-катода формируется зона термического осушения грунта ($r = 90 \text{ мм}$), по мере удаления от оси электрода анизотропия УЭС значительно сглаживается;

- в загрязненном грунте в прикатодной зоне не зафиксировано ярко выраженного слоя термического осушения, в остальном структура данной зоны не отличается от чистого грунта; в прианодном объеме сектор скопления нефтепродукта достигает $\Delta\varphi = 180^\circ$.

Временной характер описанных выше процессов в приэлектродных областях на основной оси обработки характеризуется графиками зависимостей относительного УЭС ρ/ρ_0 в характерных точках массива от токорасхода $I \cdot t$, приведенными на рис.3.11.

Результаты исследований физических свойств грунтов до и после обработки массива приведены в табл.3.3, а гранулометрического состава грунта – в табл.3.4.

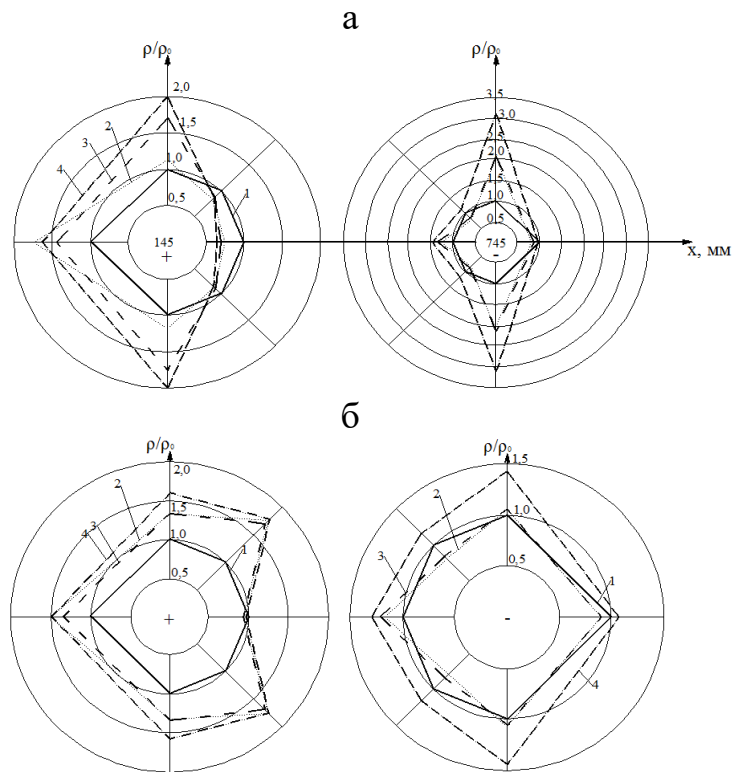


Рис. 3.9. Круговые диаграммы изменения УЭС чистого грунта при электрохимической обработке при $r = 90\text{ мм}$ (а) и $r = 150\text{ мм}$ (б): 1 – начало обработки; 2 – токорасход $I \cdot t = 6\text{ А} \cdot \text{ч}$; 3 – $13,5\text{ А} \cdot \text{ч}$; 4 – $22,5\text{ А} \cdot \text{ч}$

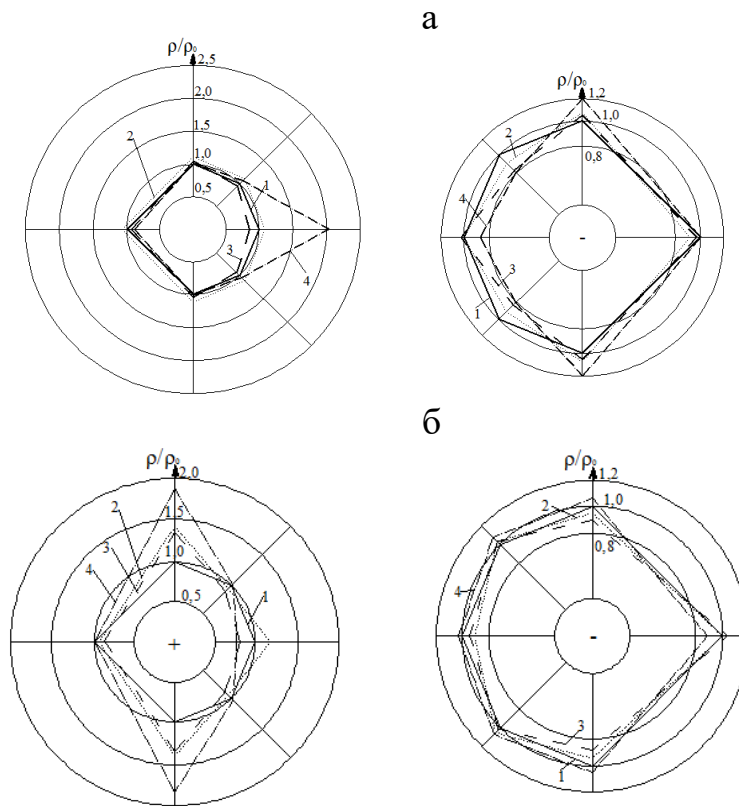


Рис. 3.10. Круговые диаграммы изменения УЭС загрязненного отработанным маслом грунта при электрохимической обработке при $r = 90\text{ мм}$ (а) и $r = 150\text{ мм}$ (б): 1 – начало обработки; 2 – токорасход $I \cdot t = 21,3\text{ А} \cdot \text{ч}$; 3 – $30,3\text{ А} \cdot \text{ч}$; 4 – $65,1\text{ А} \cdot \text{ч}$

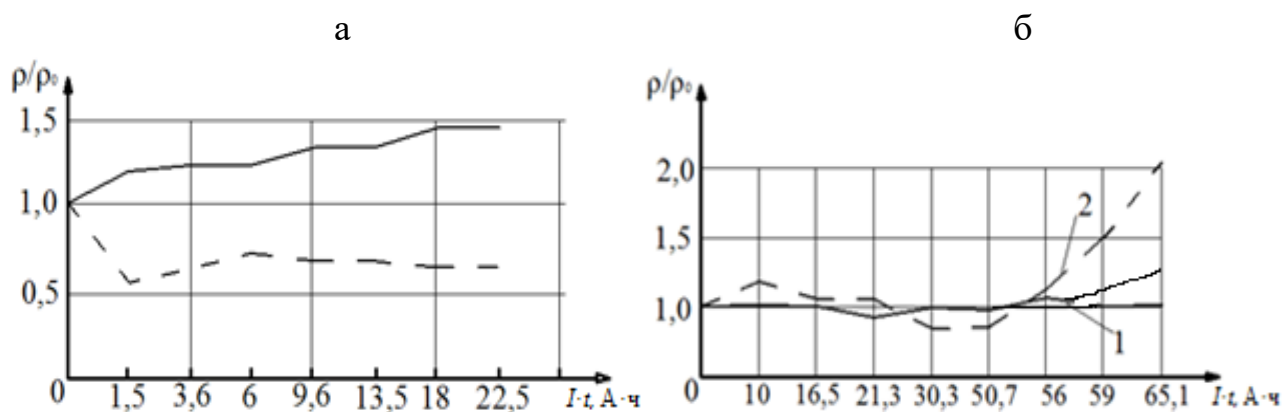


Рис. 3.11. Изменение УЭС чистого (а) и загрязненного отработанным маслом *Shell Helix Ultra* (б) грунта при электрохимической обработке:
1 – на датчике №1 около отрицательного электрода; 2 – на датчике №8 около положительного электрода

Таблица 3.3

Изменение физических параметров грунта в результате электрообработки

Номер ванны расположение пробы	Характеристики (до/после обработки)		
	Влажность, %	Плотность во влажном состоянии, г/см ³	Плотность в сухом состоянии, г/см ³
№ 1 на +электроде	35,3/28,1	2,38/2,22	1,76/1,728
№ 1 в середине	35,2/30,1	2,33/2,2	1,73/1,694
№ 1 на - электроде	35,2/29,6	2,14/2,01	1,58/1,55
№ 2 на +электроде	39,4/29,1	2,51/2,28	1,8/1,766
№ 2 в середине	39,4/31,3	2,48/2,23	1,78/1,746
№ 2 на - электроде	39,4/28,8	2,44/2,22	1,75/1,72

Таблица 3.4

Изменение гранулометрического состава грунта в результате электрообработки

Номер ванны расположение пробы	Содержание фракций (мм), % (до/после обработки)				
	2	0,5	0,25	0,1	< 0,1
№ 1 на +электроде	8,8/12,0	33,3/36,0	17,5/15,0	19,2/19,0	21,2/18,0
№ 1 в середине	8,8/9,8	33,3/34,1	17,5/16,2	19,2/23,0	21,2/16,9
№ 1 на - электроде	8,8/9,5	33,3/37,2	17,5/15,7	19,2/22,0	21,2/15,6
№ 2 на +электроде	8,8/6,1	33,3/41,8	17,5/15,8	19,2/31,2	21,2/5,1
№ 2 в середине	8,8/7,3	33,3/38,2	17,5/16,3	19,2/26,2	21,2/12,0
№ 2 на - электроде	8,8/8,6	33,3/43,7	17,5/14,5	19,2/24,8	21,2/8,4

Динамика изменения гранулометрического состава грунта в межэлектродном пространстве на конечной стадии обработки отражена графиками на рис. 3.12.

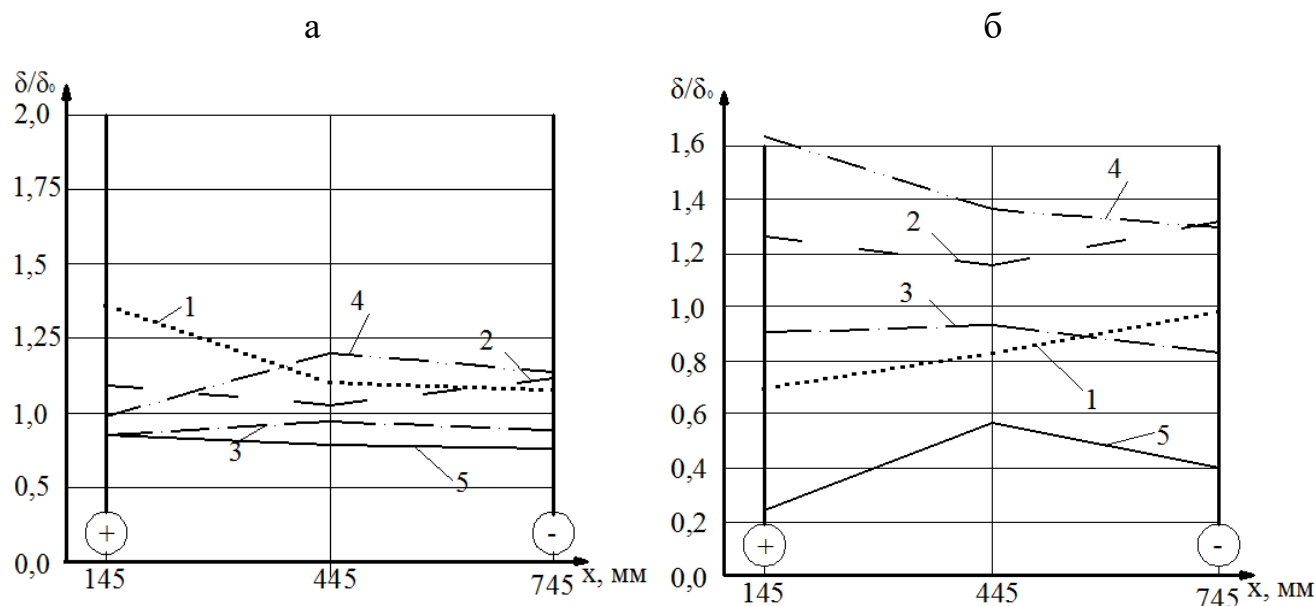


Рис. 3.12. Изменение гранулометрического состава чистого (а) и загрязненного (б) грунта при электрохимической обработке:

1 – фракция 2 мм; 2 – 0,5 мм; 3 – 0,25 мм; 4 – 0,1 мм; 5 – <0,1 мм

Из данных табл. 3.3 следует, что в обоих грунтах при электрообработке происходит химическое связывание влаги и нефтепродукта, что приводит к общему снижению влажности грунта на 5-20 % и снижению его плотности на 2-10 % как во влажном, так и в сухом состояниях.

Весьма существенные изменения установлены в гранулометрическом составе грунта:

- в чистом грунте только в анодной зоне установлено резкое снижение содержания фракции менее 0,1 мм и увеличение фракции 2,0 мм;

- в загрязненном грунте на всем протяжении зоны обработки происходит увеличение размера частиц с переходом фракции < 0,1 мм в диапазон 0,1-0,5 мм вследствие процессов коагуляции масла, слипания мелких частиц, при этом вероятен переход нефтепродукта из жидкого состояния в твердое, которое считается менее токсичным и менее экологически вредным.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- при пропускании электрического тока и воздействии его на нефтепродукты в порах грунта они переходят в твердое связанное состояние, что приводит к увеличению УЭС грунта на всем протяжении зоны обработки, а также к уменьшению влажности;
- в результате электролитического воздействия постоянного тока на загрязненный массив происходит образование твердых частиц и слипание этих частиц, что приводит к изменению гранулометрического состава глинистого грунта в сторону увеличения содержания более крупных фракций;
- при обработке грунта электрическим током влажность грунта снижается, а увеличение процентного содержания крупных фракций приводит к снижению плотности грунта как во влажном, так и в сухом состоянии;
- процесс фазового преобразования нефтесодержащего продукта в порах грунта, обусловленный электрической и термической коагуляцией, происходит во всем межэлектродном пространстве.

На второй стадии эксперимента была произведена параллельная обработка грунта в двух ваннах. В первую (№3) был загружен чистый суглинок массой 250 кг, перемешанный с водой (42 кг) и дизельным топливом (8,3 кг), а во вторую (№4) – суглинок той же массы, перемешанный с водой (46 кг) и отработанным маслом – нефтезагрязнителем (8,2 кг). В процессе обработки в электроды-инъекторы подавался растворитель нефтепродуктов Гексан-н. На ванне с дизельным топливом промывающая жидкость подавалась на положительный электрод при токорасходе $I \cdot t = 11,4$ и $17,55$ А·ч и на отрицательный электрод при $I \cdot t = 37$ и $42,8$ А·ч в объеме 400 мл. На ванне с отработанным маслом растворитель подавался на положительный электрод при $I \cdot t = 17,1$ и $35,4$ А·ч и на отрицательный электрод при $I \cdot t = 49,4$ и $61,1$ А·ч в объеме 600 мл.

Графики изменения относительного УЭС по основной оси электрообработки при различных значениях токорасхода $I \cdot t$ приведены на рис.3.13 и 3.14.

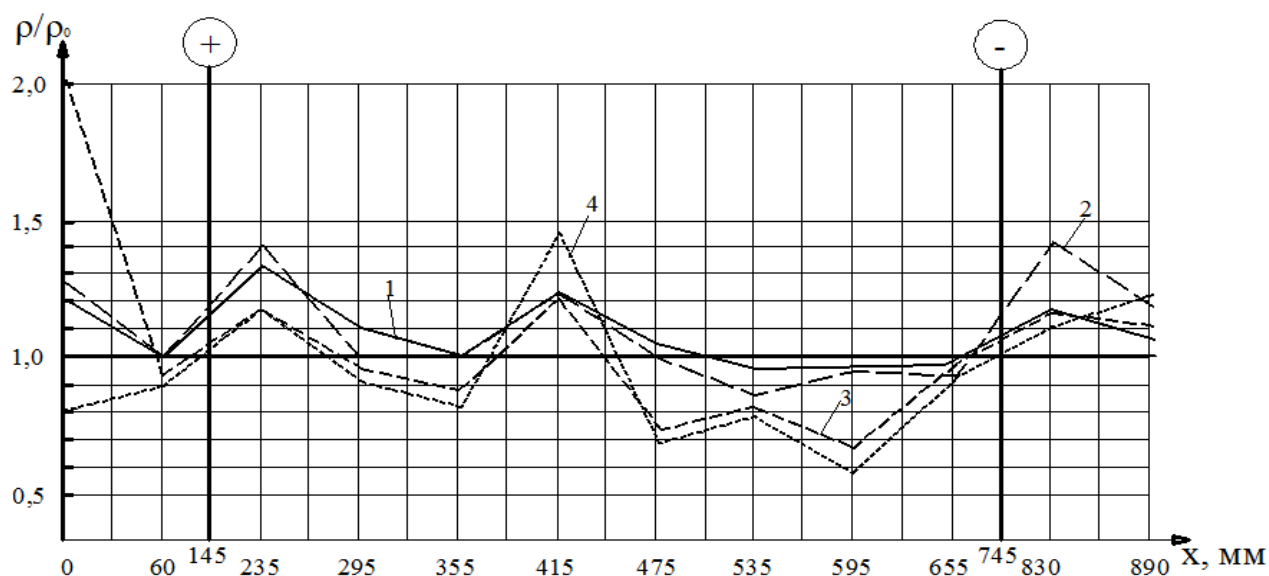


Рис. 3.13. Изменение УЭС загрязненного дизельным топливом грунта с очисткой растворителем при электрохимической обработке:

1 – $I \cdot t = 13,8 \text{ А} \cdot \text{ч}$; 2 – $31,6 \text{ А} \cdot \text{ч}$; 3 – $42,8 \text{ А} \cdot \text{ч}$; 4 – $69,3 \text{ А} \cdot \text{ч}$

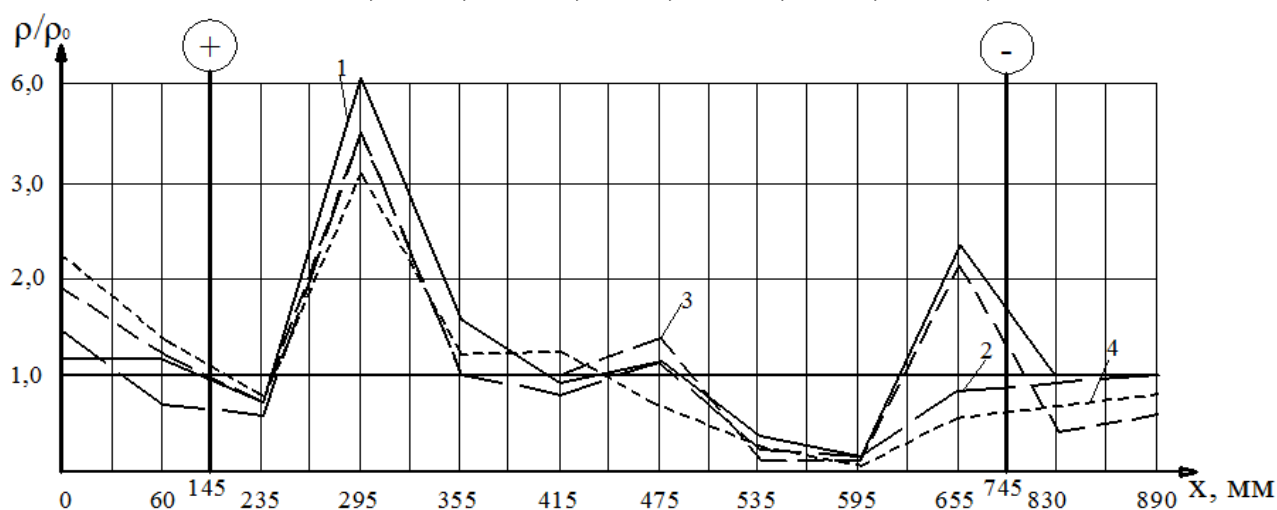


Рис. 3.14. Изменение УЭС загрязненного отработанным маслом грунта с очисткой растворителем при электрохимической обработке:

1 – $I \cdot t = 17,1 \text{ А} \cdot \text{ч}$; 2 – $42,7 \text{ А} \cdot \text{ч}$; 3 – $87,1 \text{ А} \cdot \text{ч}$; 4 – $108 \text{ А} \cdot \text{ч}$

Из приведенных результатов эксперимента следует, что электроосмотические процессы в приэлектродных областях при обработке растворителем грунта, загрязненного различными по вязкости и химическому составу нефтепродуктами, имеют общие тенденции, обусловленные высоким электросопротивлением нефтепродуктов (все нефтепродукты проявляют ярко выраженные диэлектрические свойства $\rho > 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$):

- при подаче растворителя на анод жидкость распространялась в массив и скапливалась на катоде, после подачи растворителя на катод жидкость частич-

но распространялась в массив, а затем скапливалась опять на катоде, при этом наблюдалось понижение электросопротивления в месте разжижения загрязнителя и распространения растворителя;

- в грунте происходит поступательное перемещение влаги от катода к аноду в первом периоде обработки без растворителя, что приводит к уменьшению УЭС на аноде и увеличению на катоде вследствие скопления нефтепродукта – диэлектрика, но после добавления растворителя в поровом пространстве происходит смешивание жидкостей (влаги, растворителя и загрязнителя), что ведет к уменьшению УЭС в зонах скопления разжиженного раствора и увеличению в зонах массива, где процесс разжижения по причине отсутствия растворителя не произошёл;

- снижение УЭС на участке $1/3$ расстояния между электродами свидетельствует о том, что около катода формируется зона скопления разжиженного загрязнителя: это подтверждается визуально следами нефтесодержащей жидкости в дренажных отверстиях электрода и частичным ее испарением.

Гидродинамические процессы в приэлектродных областях характеризуются круговыми диаграммами УЭС, приведенными на рис.3.15 и 3.16.

Установлена следующая особенность формирования приэлектродных объемных зон: в грунте наблюдается линейность распространения растворителя от электрода-инъектора при $r = 90$ мм, так как ярко выражена асимметричность прикатодной и прианодной зоны, при $r = 150$ мм диаграмма становится более симметричной, что объясняется более равномерным распространением растворителя в массиве.

Равномерность во времени описанных выше процессов в приэлектродных областях на основной оси обработки характеризуется графиками зависимостей относительного УЭС ρ/ρ_0 в характерных точках массива от токорасхода $I \cdot t$, приведенными на рис.3.17.

Из графиков следует, что введение в грунт активного раствора заметно усиливают электроосмотические процессы переноса порозаполняющей жидкости преимущественно в прикатодной области, при этом уменьшение уровня УЭС на 10-20% свидетельствует об относительном повышении в данной зоне содержания естественной поровой влаги.

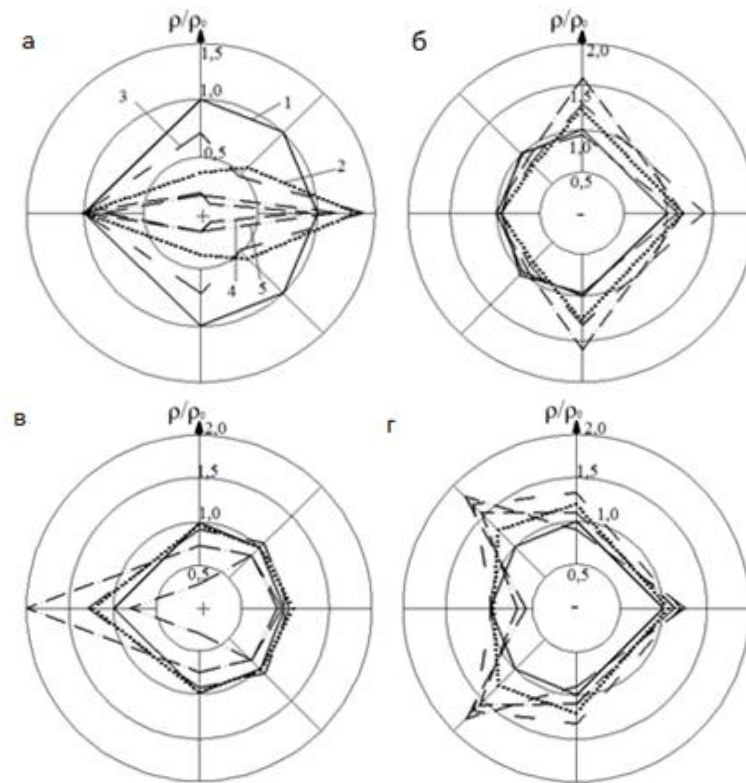


Рис. 3.15. Круговые диаграммы изменения УЭС загрязненного дизельным топливом грунта при электрохимической обработке при $r = 90$ мм (а, б), $r = 150$ мм (в, г): 1 – начало обработки; 2 – $I \cdot t = 13,8$ А·ч; 3 – $31,6$ А·ч; 4 – $42,8$ А·ч; 5 – $69,3$ А·ч

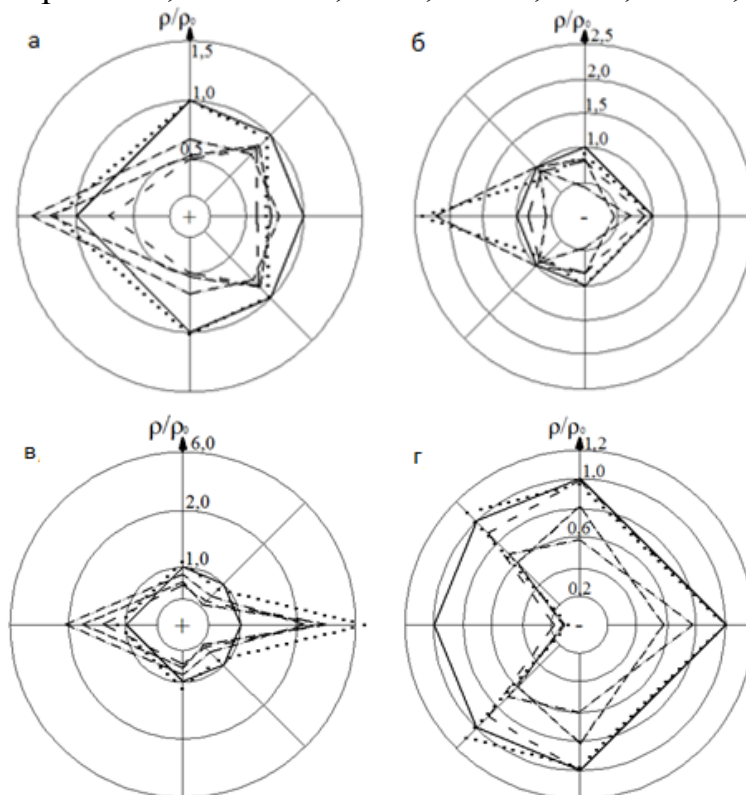


Рис. 3.16. Круговые диаграммы изменения УЭС загрязненного отработанным маслом грунта при электрохимической обработке при $r = 90$ мм (а, б), $r = 150$ мм (в, г): 1 – начало обработки; 2 – $I \cdot t = 17,1$ А·ч; 3 – $42,7$ А·ч; 4 – $87,1$ А·ч; 5 – 108 А·ч

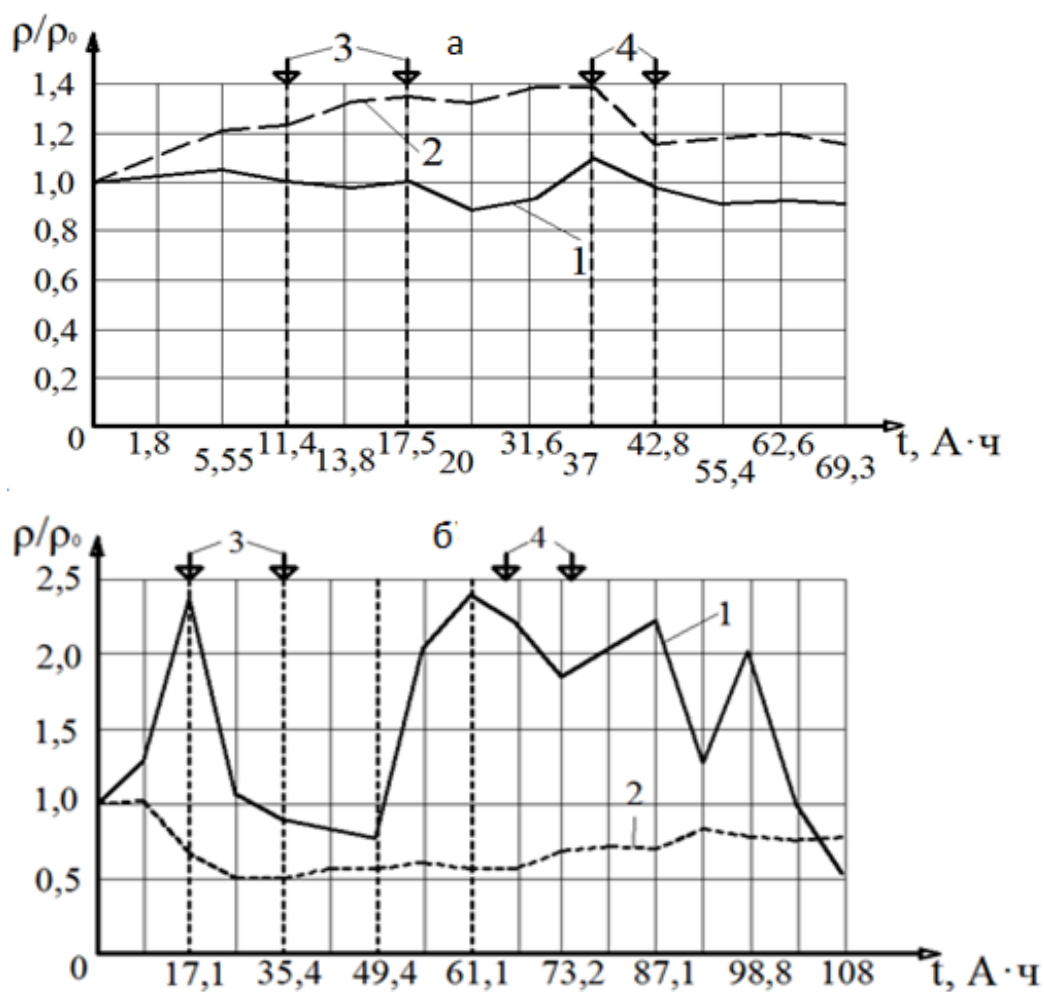


Рис. 3.17. Изменение УЭС загрязненного дизельным топливом (а) и отработанным маслом (б) грунта с очисткой растворителем при электрохимической обработке:

1 – на датчике №1 около отрицательного электрода; 2 – на датчике №8 около положительного электрода; 3 – момент подачи растворителя в положительный электрод; 4 – момент подачи растворителя в отрицательный электрод

Результаты исследований физических свойств грунтов до и после обработки массива приведена в табл. 3.5, а гранулометрического состава грунта – табл. 3.6.

Из данных табл. 3.5 следует, что в обоих грунтах при электрообработке происходит химическое связывание влаги и нефтепродукта, что приводит к общему снижению влажности грунта на 1-5% и его плотности до 5%, при этом плотность в сухом состоянии изменяется неоднозначно: при загрязнении дизельным топливом она увеличивается до 6,5%, а при загрязнении маслом – уменьшается до 4%.

Таблица 3.5

Изменение физических параметров грунта в результате электрообработки

Номер ванны расположение пробы	Характеристики (до/после обработки)		
	Влажность, %	Плотность во влажном состоянии, г/см ³	Плотность в сухом состоянии, г/см ³
№ 3 на +электроде	35,9/31	2,1/2,15	1,54/1,64
№ 3 в середине	35,9/29,3	2,1/2,08	1,54/1,61
№ 3 на - электроде	35,9/30,9	2,1/2,12	1,54/1,62
№ 4 на +электроде	31,6/30,7	2,14/2,04	1,62/1,56
№ 4 в середине	31,6/30,7	2,14/2,05	1,62/1,57
№ 4 на - электроде	31,6/31,4	2,14/2,12	1,62/1,61

Таблица 3.6

Изменение гранулометрического состава грунта в результате электрообработки

Номер ванны расположение пробы	Содержание фракций (мм), % (до/после обработки)				
	2	0,5	0,25	0,1	< 0,1
№ 3 на +электроде	6,62/17	36,3/38,7	14,2/12,7	32,7/17,5	10,2/14
№ 3 в середине	6,62/10,2	36,3/42,9	14,2/10,3	32,7/26,3	10,2/10,3
№ 3 на - электроде	6,62/10,3	36,3/45,7	14,2/13,1	32,7/16,4	10,2/14,5
№ 4 на +электроде	17,5/5,55	41,7/37,8	11,6/15,5	15,7/35,4	13,6/5,8
№ 4 в середине	17,5/3,55	41,7/35,8	11,6/15,9	15,7/41,3	13,6/3,4
№ 4 на - электроде	17,5/7,03	41,7/36,5	11,6/13,9	15,7/37,6	13,6/4,9

Весьма существенные изменения установлены в гранулометрическом составе грунта:

- в загрязненном грунте при обработке растворителем наибольшие изменения гранулометрического состава происходят в районе катода, что является следствием скопления вокруг электрода разжиженного загрязнителя;

- на всем протяжении зоны обработки происходит изменение размера частиц, при более вязком загрязнителе (масло, ванна №4) наблюдается преимущественно переход фракции <0,1 мм в диапазон 0,1-0,5 мм вследствие процессов коагуляции масла, слипания мелких частиц, при этом вероятен переход нефтепродукта из жидкого в твердое состояние, которое считается менее токсичным и экологически вредным, при загрязнении менее вязким дизельным топливом более существенно увеличивается содержание фракции > 0,5 мм.

Более подробно данные результаты описаны в статьях[108-111].

После прекращения обработки током было произведено извлечение грунта из емкостей со снятием слоями высотой от 4 до 6 см, при этом производили

фотофиксацию и сопоставляли полученные данные электромониторинга с фактическим состоянием грунта.

Около катода и анода на поверхности грунта появились трещины с глубиной около катода до 8 см, у анода – до 17 см (рис. 3.18 а).

Грунт около катода рыхлый и легко крошится, а возле анода – прочный и не осыпается в перфорационные отверстия электрода. Грунт около анода по всей глубине имеет характерный серый отблеск и отличается по цвету (рис. 3.18 б). В зоне катода грунт желто-коричневого цвета, схож с естественным цветом глины, а у анода – темно-серого и темно-коричневого цвета.

При сравнении результатов визуального анализа фактического состояния грунта на глубине установки датчиков (рис. 3.18 в) с данными, полученными электрофизическим методом, установлено, что на катоде после обработки величина УЭС меньше первоначальной, и именно на этом электроде происходило скопление растворителя после его подачи. На аноде в этот момент величина УЭС возросла более чем в 2 раза, что также соответствует фактическому состоянию грунта, так как его цвет совпадает с цветом загрязнителя. За счет движения жидкости в прикатодной зоне произошла промывка этой зоны, за счет чего она приобрела более естественный оттенок. На аноде движение и разжижение нефтепродуктов произошло менее интенсивно и это повлияло на остаточное загрязнение нефтепродуктом.

Дополнительно были изучены образцы грунта под электродами на контакте с гидроизолирующей пленкой на дне ванны, т. к. эта зона могла послужить местом скопления жидкостей. Было обнаружено, что под катодом грунт содержит отдельные вкрапления нефтепродукта, а под анодом образец покрыт сплошной пленкой нефтепродукта (рис. 3.19).

Таким образом, результаты измерения УЭС и определения физических характеристик грунта были в целом подтверждены результатами визуального осмотра при извлечении обработанного электрохимическим способом грунта.

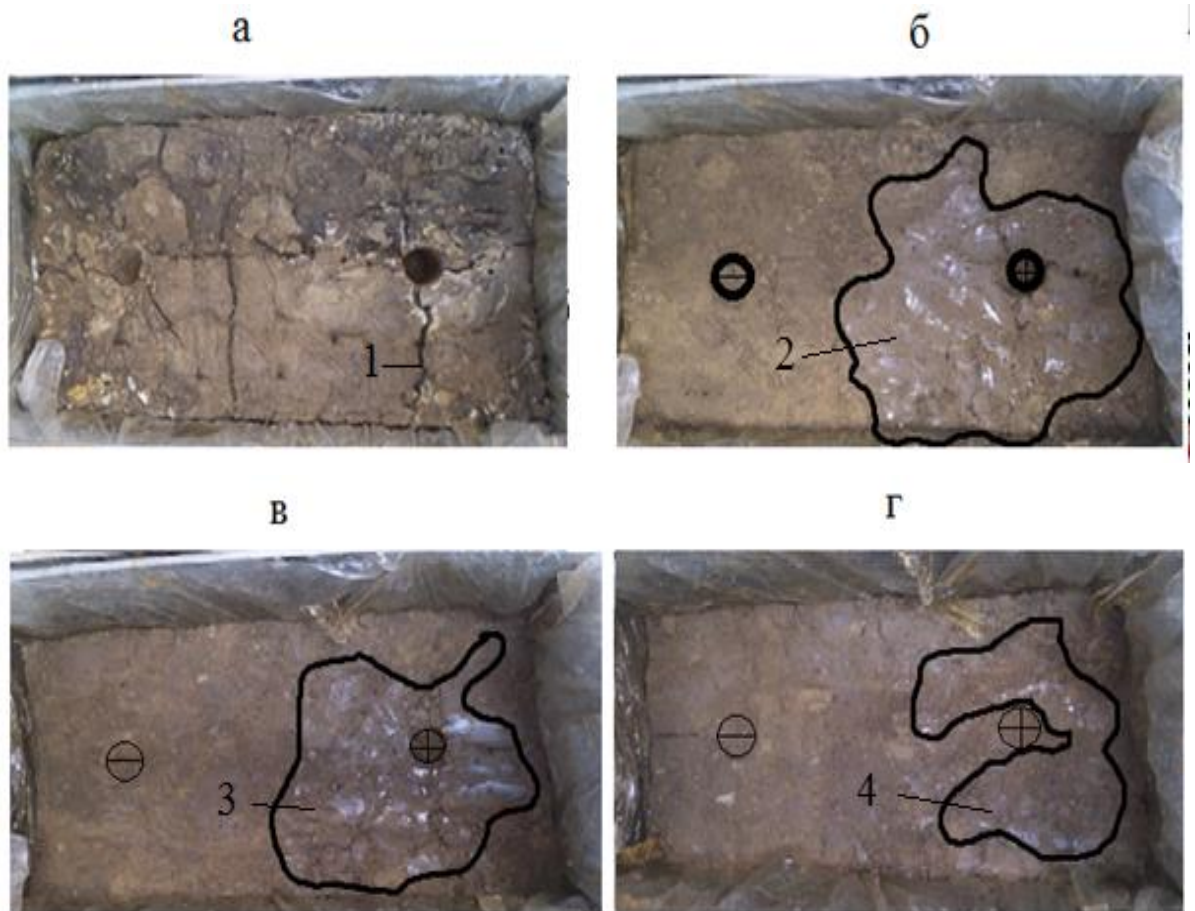


Рис. 3.18. Результаты визуального послойного осмотра грунта после электрохимической обработки: верхний слой грунта (а), грунт на глубине 8 см (б), грунт на глубине установки датчиков (в), нижний слой грунта (г):
 1 – трещины в грунте; 2 – серый отблеск глинистого массива; 3 – зона грунта с темно-серым отблеском на глубине установки датчиков;
 4 – зона остаточного загрязнения



Рис. 3.19. Вид образцов грунта под электродами-инъекторами, анодом (а) и катодом (б)

3.3. Испытание метода контролируемой электрохимической очистки грунтов от нефтезагрязнений в натуральных условиях на опытном полигоне

При сохранении геометрической адекватности условия лабораторного эксперимента существенно отличаются от натуральных. Принципиальные отличия состоят в следующем:

- ограниченность объема грунта изолирующими поверхностями приводит к искажению физических полей (электрических, гидро- и термодинамических);
- исключается взаимодействие зоны обработки с прилегающим грунтовым массивом;
- не учитывается взаимовлияние пар электродов в многоэлектродных установках;
- не обеспечивается интегральный геофизический контроль процессов в зоне обработки;
- не учитывается изменение физических свойств грунтового массива под воздействием атмосферы.

Проведение натурного эксперимента позволило проверить достоверность установленных в лабораторных условиях закономерностей.

Для производственных исследований процессов, протекающих в массиве грунта при электрохимической очистке от нефтезагрязнений, был подготовлен экспериментальный участок глинистого грунтового массива. План опытного участка, схема подключения электродов и электросиловой установки представлены на рис. 3.20.

Вблизи места, предназначенного для очистки, были установлены электросиловая установка (силовой трансформатор ТС-40, выпрямитель-преобразователь), емкости для хранения загрязняющих веществ (отработанное масло и бензин АИ-80).

Постоянный ток от установки к электродам подавался по кабелям типа КГ 4×25-0,66. С помощью установки возможно регулировать силу тока от 0,1 до 40 А и напряжение до 360 В. Так как обработка массива проводилась непрерывно, то в целях безопасности вокруг обрабатываемого участка были поставлены ограждение и осветительные фонари. В качестве электродов были использованы перфорированные стальные трубы диаметром 57 мм. Глубина их

погружения составила 2,3 м. Для электрохимической очистки применялась порядная схема подключения электродов, при этом полярность имела вид: «катод-анод-катод». Расстояние между рядами электродов 1200 мм, а между разноименными по полярности электродами 600 мм.

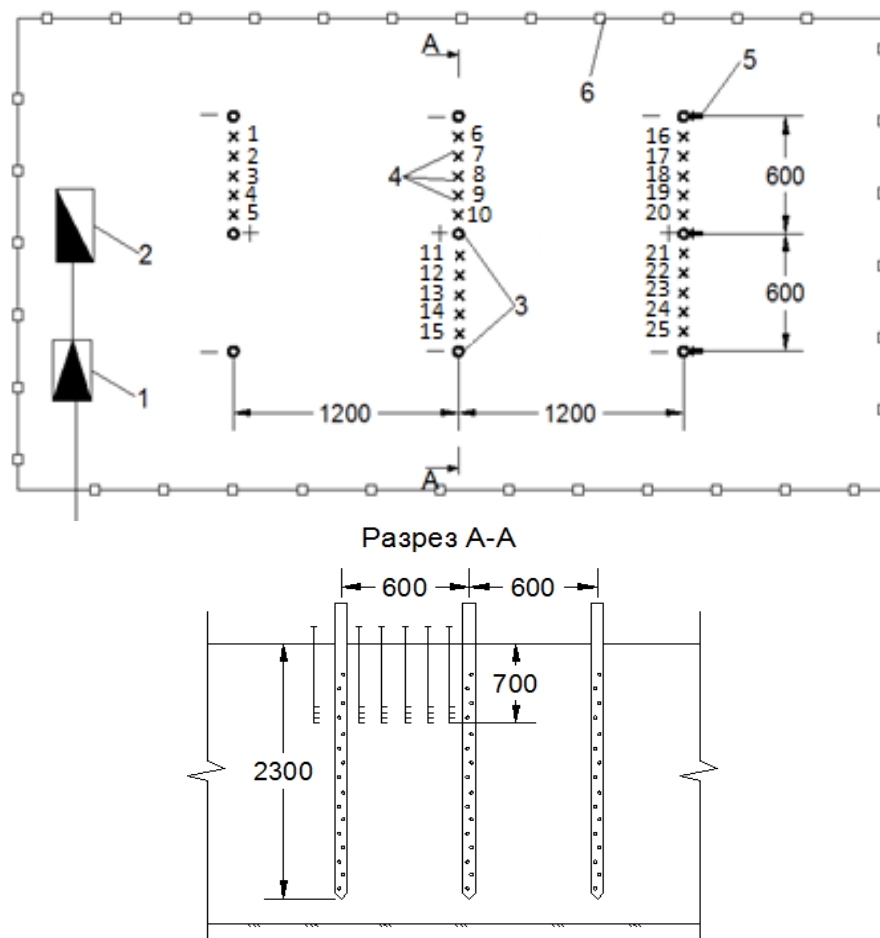


Рис. 3.20. Схема установки для проведения натурального эксперимента:

- 1 – силовой трансформатор; 2 – выпрямитель-преобразователь;
3 – электроды-инъекторы; 4 – микродатчики электросопротивления;
5 – подача Гексан-н; 6 – временное защитное ограждение

Глинистый массив, находившийся в естественном состоянии, был искусственно загрязнен нефтепродуктом для проведения эксперимента, для чего в шпуров диаметром 12 мм, на глубину 700 мм (объем полости около 80 мл) был залит загрязнитель. Отверстия расположены через 80-100 мм равномерно во всех направлениях. Нефтезагрязнитель из полостей впитался в грунт, проникая вглубь и в стороны, тем самым сформирована загрязненная зона минимальной глубиной до 2 м, что соответствует параметрам загрязнения грунта в естественных условиях (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Вид зоны загрязнения и зоны электрохимической обработки:
 1 – массив, загрязненный отработанным маслом; 2 – массив, загрязненный бензином;
 3 – массив, загрязненный отработанным маслом с обработкой растворителем;
 4 – массив, загрязненный бензином с обработкой растворителем;
 5 – чистый глинистый массив

Основные параметры опытной установки следующие:

- количество электродов инъекторов – 9;
- глубина обработки – 2,3 м;
- расстояние между электродами – инъекторами – 0,6 м;
- диапазон плотности тока – 8-20 А/м²;
- время обработки – 168 ч;
- общий токорасход $I \cdot t$ – 3650 А·ч;
- режимы обработки – электроосмотический незагрязненного массива, электроосмотический загрязненного массива, электроосмотический с разжижением загрязнителя растворителем Гексан-н;
- загрязняющий нефтепродукт – бензин АИ-80; отработанное автомобильное масло (*Shell Helix Ultra*)

На всех этапах экспериментальных исследований проводился непрерывный физико-технический контроль процессов в зоне электрообработки, включающий инженерно-геологические изыскания и геофизический мониторинг, как локальный (микродатчиками УЭС), так и интегральный (электрическое зондирование и георадиолокация). Информация о способах физико-технического контроля грунтового массива приведена в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Способы физико-технического контроля процессов в зоне обработки

Способы контроля	Аппаратура	Решаемые задачи, определяемые параметры
1.Инженерно-геологические изыскания	Полевая лаборатория ПЛЛ-2: набор бюкс для определения влажности, весы электронные, духовой шкаф, набор сит	Определение физико-механических характеристик и гранулометрического состава грунта в различные моменты времени
2.Микродатчики УЭС	Каротажный прибор КП-2 Датчики микрозонды	Мониторинг изменения истинного УЭС грунта с шагом 0,1-0,15 м
3.Электрическое зондирование	Каротажный прибор КП-2 электроды	Определение эффективного УЭС грунта на различных стадиях электрообработки
4.Георадиолокация	Георадар ОКО-2	Диагностирование аномалии по глубине и в плане по радарограмме

После начала электрообработки глинистого массива замеры всех основных характеристик производились два раза в сутки, при этом электросиловая установка отключалась. По окончании электрообработки грунтов в наиболее характерных местах (чистый участок, загрязненный маслом и загрязненный бензином участок) производился отбор проб и определялись физико-механические свойства и гранулометрический состав грунта.

Общая продолжительность обработки грунта током составила более 168 ч при токорасходе на одну пару электродов-инъекторов более 600 А·ч. Первый участок с чистой глиной обрабатывался методом электроосмоса без добавления жидкостей в электроды, чтобы сравнить полученные при этом данные с результатами по обработке загрязненного глинистого массива. Второй и третий участки, загрязненные соответственно отработанным маслом и бензином, обрабатывались электрическим током без применения активного вещества – растворителя. Четвертый и пятый участки, также загрязненные отработанным маслом

и бензином, обрабатывались электрическим током и активным веществом растворителем Гексан-н. Растворитель подавался в электрод-анод в моменты времени $t = 48$ и 60 ч в объеме 4 л за один прием. График изменения режима электросиловой установки представлен на рис. 3.22.

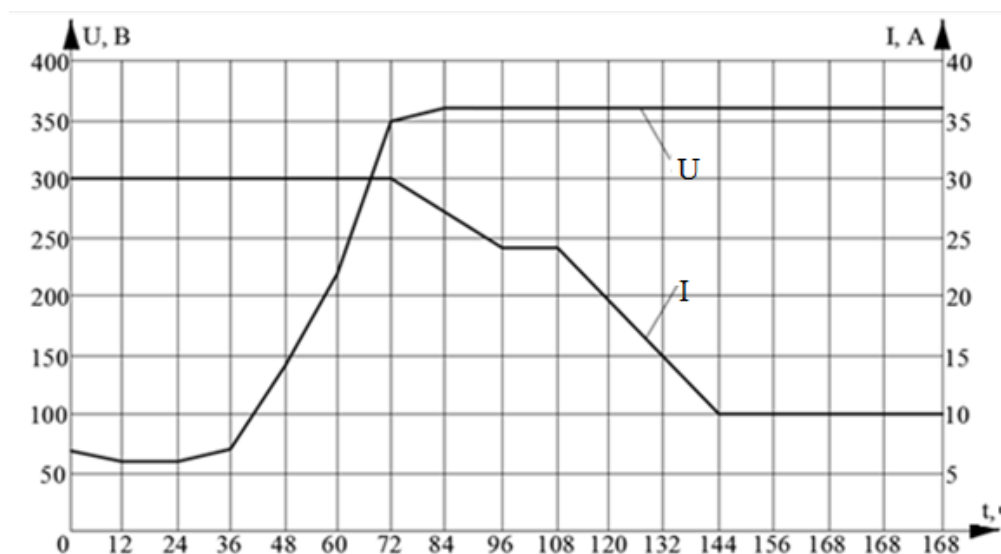


Рис. 3.22. Изменение напряжения U и силы тока I за время t электрообработки

Для определения физических свойств грунтов была отобрана серия образцов на участках до загрязнения глинистого массива, после его загрязнения нефтепродуктом, после завершения электрохимической обработки.

Результаты исследований физических свойств грунтов до и после обработки массива приведены в табл. 3.8, а гранулометрического состава грунта — в табл. 3.9.

Из данных табл. 3.8 следует что в грунте как в чистом, так и в загрязненном различными нефтепродуктами состояниях после электрообработки происходит химическое связывание влаги и нефтепродукта, что приводит к общему снижению влажности грунта на 3-6 % и снижению его плотности на 3-7 % как во влажном, так и в сухом состояниях. При загрязнении грунта нефтепродуктами произошло увеличение влажности, так как увеличилось содержание поровой жидкости на опытном участке грунта. В сравнении с результатами лабораторных исследований изменения влажности и плотности менее существенны, что связано с влиянием атмосферы и близ расположенного массива, находящегося в состоянии естественной влажности.

Таблица 3.8

Изменение физических параметров грунта в результате электрообработки

Номер образца	Характеристики (до загрязнения/до обработки/после обработки)		
	Влажность, %	Плотность во влажном состоянии, г/см ³	Плотность в сухом состоянии, г/см ³
№1, чистая глина	19,7/19,7/14,6	1,82/1,82/1,73	1,52/1,52/1,51
№2, загрязнение маслом	19,7/20,1/17,1	1,82/1,80/1,71	1,52/1,5/1,46
№3, загрязнение бензином	19,7/19,8/15,5	1,82/1,82/1,71	1,52/1,52/1,48
№4, загрязнение маслом, с применением растворителя	19,7/20,1/15,7	1,82/1,91/1,79	1,52/1,59/1,55
№5 загрязнение бензином, с применением растворителя	19,7/19,8/14,8	1,82/1,87/1,77	1,52/1,56/1,54

Таблица 3.9

Изменение гранулометрического состава грунта в результате электрообработки

Номер образца	Содержание фракций (мм), % (до/после обработки)				
	2	0,5	0,25	0,1	< 0,1
№1, чистая глина	2/2,2	17,6/18,5	15,5/17,4	18,8/21,2	46,1/40,7
№2, загрязнение маслом	2/3	17,6/20,2	15,5/21,3	18,8/27,9	46,1/27,6
№3, загрязнение бензином	2/2,5	17,6/19,7	15,5/18,5	18,8/24,4	46,1/34,9
№4, загрязнение маслом, с применением растворителя	2/1,8	17,6/17,8	15,5/16,6	18,8/29,4	46,1/34,4
№5 загрязнение бензином, с применением растворителя	2/2,8	17,6/19,3	15,5/19,2	18,8/27,7	46,1/31

В гранулометрическом составе грунта установлены существенные изменения:

- в чистом грунте установлено небольшое снижение (с 48 до 40%) содержания фракции < 0,1 мм и увеличение фракций 0,5 мм, 0,25 мм и 0,1 мм;

- в загрязненном отработанным маслом грунте происходит значительное увеличение (с 18,8 до 23,4%) количества частиц фракции 0,1 мм, небольшое увеличение количества частиц фракции 0,25 мм, 0,5 мм, и при этом происходит значительное (с 46,1 до 27,6%) уменьшение частиц фракции < 0,1 мм вследствие процессов коагуляции масла, слипания мелких частиц, при этом вероятен переход нефтепродукта из жидкого в твердое состояние, которое считается менее токсичным и экологически вредным, причем при электрохимической обработке растворителем этот процесс проходил с меньшей интенсивностью, чем при обработке электрическим током без растворителя;

- в загрязненном бензином грунте происходит значительное увеличение (с 18,8 до 24,4%) количества частиц фракции 0,1 мм, небольшое увеличение количества частиц фракции 0,25 мм, 0,5 мм, при этом происходит значительное (с 46,1 до 34,9 %) уменьшение частиц фракции $< 0,1$ мм как при обработке с растворителем, так и без растворителя; увеличение количества более крупных частиц в грунте, загрязненном отработанным маслом, происходит интенсивнее, чем при загрязнении бензином, так как отработанное масло более густое, чем бензин, оно в большей степени обволакивает частицы грунта при загрязнении и электрообработке.

На рис. 3.23 все изменения гранулометрического состава, описанные выше, представлены в графическом виде. Из графиков следует, что наиболее существенные качественные изменения гранулометрического состава грунтов происходят в диапазоне от $< 0,1$ до 0,25 мм.

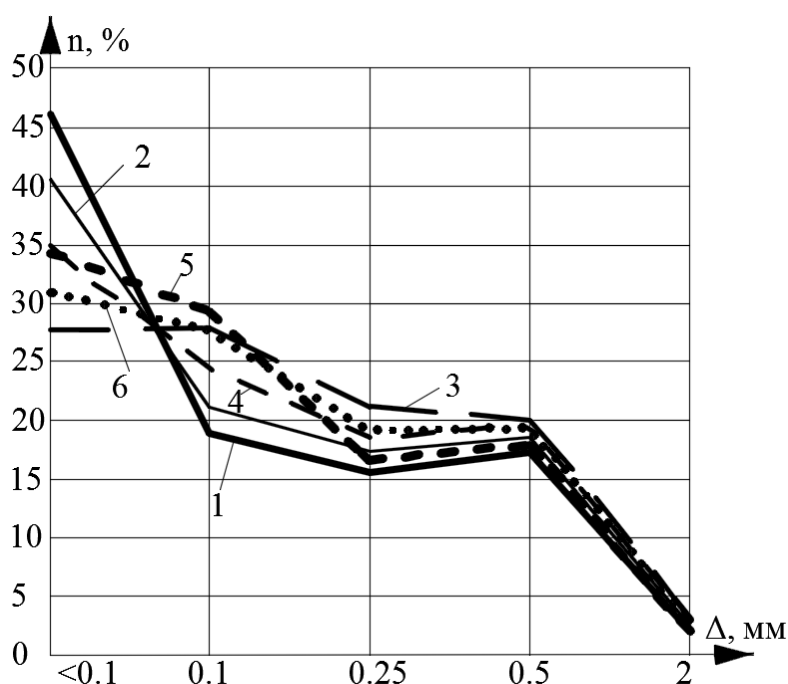


Рис. 3.23. Изменение гранулометрического состава грунта в зависимости от вида обработки и времени:

- 1 – чистая глина до электрообработки; 2 – чистая глина после электрообработки; 3 – загрязнение отработанным маслом после электрообработки; 4 – загрязнение бензином после электрообработки; 5 – загрязнение отработанным маслом после электрообработки с растворителем; 6 – загрязнение бензином после электрообработки с растворителем.

После прекращения электрообработки было произведено извлечение грунта из загрязненной и обработанной зоны, со снятием слоями толщиной от 8 до 12 см, при этом производили фотофиксацию и сопоставляли полученные данные о физических свойствах грунта с фактическим его состоянием.

Было обнаружено, что глина при загрязнении бензином имеет темно-розовый цвет на глубину от 40 до 80 см. При загрязнении отработанным маслом глина приобрела черный цвет, который наблюдался на глубину от 80 до 140 см. При разработке по всей глубине грунт не имел трещин, у поверхности на глубину до 70 см видны отверстия, пробитые для загрязнения участка нефтепродуктами.

В прикатодной и прилегающей к ней зоне грунт рыхлый и легко крошится, а возле анода – прочный и не осыпается. Грунт на контакте с электродом-инжектором очень прочный и образует наросты на трубах толщиной до 3 см.

На аноде на глубине от 50 см и ниже образовался налипший закаменевший кусок глинистого массива с цветом глины, характерным для загрязнения отработанным маслом. На рис. 3.24 а видно расположение и размер этого нароста в соотношении с диаметром трубы (57 мм). В приэлектродных зонах грунт по всей глубине проявляет отблеск и отличается по цвету: в зоне катода грунт серо-желтого цвета; у анода -темно-серого и темно-коричневого цвета, что соответствует по окончании эксперимента более очищенному состоянию грунта около катода, и с наибольшим содержанием нефтепродуктов в твердом состоянии около анода. На рис. 3.24 б выделена зона с повышенным содержанием нефтепродуктов около анода. В случае загрязнения бензином глина имеет более естественный оттенок, а при загрязнении отработанным маслом – более серый и темный оттенок, что полностью соответствует виду, консистенции, цвету загрязнителя и согласуется с результатами определения физических свойств и гранулометрического состава грунта.

При разработке грунта на глубину до 150 см глина приобрела полностью естественный оттенок и дальнейших изменений не происходило.

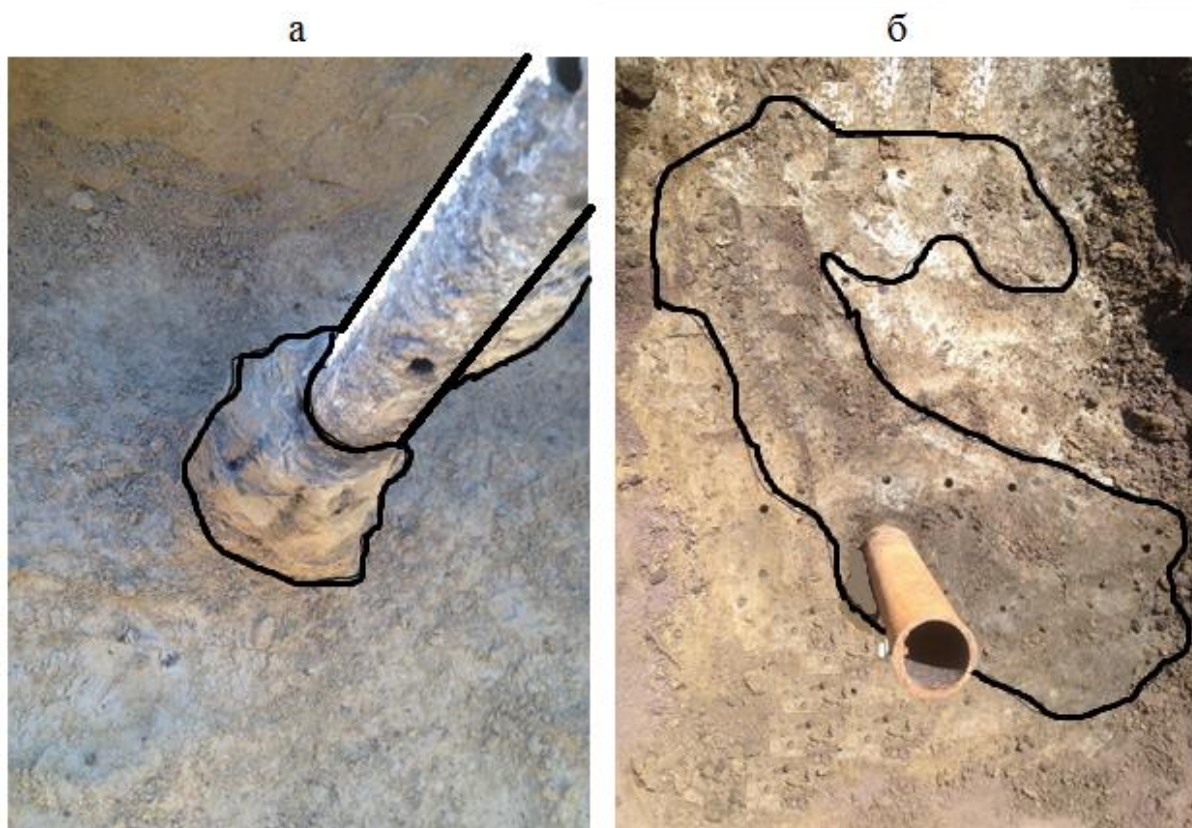


Рис. 3.24. Вид уплотненной прианодной зоны (а), вид зоны с повышенным остаточным загрязнением отработанным маслом (б)

Анализ результатов инженерно-геологических изысканий позволил сделать следующие выводы:

- при пропускании электрического тока и воздействии его на нефтепродукты в порах грунта они переходят в твердое связное состояние и происходит уменьшение влажности, что соответствует результатам лабораторных исследований на одномерной и объемной моделях, однако диапазоны данных изменений ниже, что обусловлено дополнительным поступлением влаги из атмосферы и прилегающих грунтов с естественной влажностью;

- в результате электротермического воздействия постоянного тока на загрязненный массив происходит увеличение размера твердых частиц и их слипание, что приводит к изменению гранулометрического состава глинистого грунта в сторону увеличения содержания более крупных фракций; причем увеличение количества более крупных частиц происходит интенсивнее при загрязнении более вязким нефтепродуктом;

- при обработке грунта электрическим током снижение влажности грунта и увеличение процентного содержания крупных фракций приводит к снижению плотности грунта как во влажном, так и в сухом состоянии;

- процесс фазового преобразования нефтесодержащего продукта в порах грунта, обусловленный электрической и термической коагуляцией, происходит при любом виде нефтепродукта-загрязнителя, причем при использовании растворителя этот процесс происходит менее интенсивно, однако при этом увеличивается объем скапливания разжиженного нефтепродукта в прианодной области.

Вторая часть натурного эксперимента была направлена на диагностирование зоны искусственного загрязнения грунта и мониторинг состояния этой зоны в процессе электрообработки.

Для измерения электрофизических параметров использовали две схемы: зондирование с земной поверхности, а также измерение с помощью заглубленных микродатчиков, устанавливаемых в глубине массива в специально пробуренные отверстия диаметра меньшего, чем датчики микрозонды. Для реализации четырехэлектродного метода зондирования с поверхности земли в грунт за пределами обрабатываемого участка забивали металлические питающие электроды, изготовленные из арматуры длиной 0,8 метра, диаметром 20 мм, заостренные с одной стороны, а в качестве измерительных использовали электроды-инъекторы.

Метод заглубленных микродатчиков реализован при помощи 4-электродных датчиков-зондов с расстоянием между электродами 1 см. Глубину установки l датчиков-зондов принимали из возможности максимального погружения их в грунт через отверстия глубиной 700 мм. Общее количество датчиков-зондов – 25, по 5 на каждую пару электродов, схема их размещения порядная. Измерения электрофизических свойств проводились прибором КП-2. По результатам контроля строили графики изменения УЭС ρ вдоль основной оси установки электрообработки и в зависимости от токорасхода.

Основные результаты, характеризующие процессы пространственно-временных изменений истинного удельного электросопротивления (УЭС) грунтов, полученные с помощью системы микродатчиков, представлены на рис. 3.25 и 3.26.

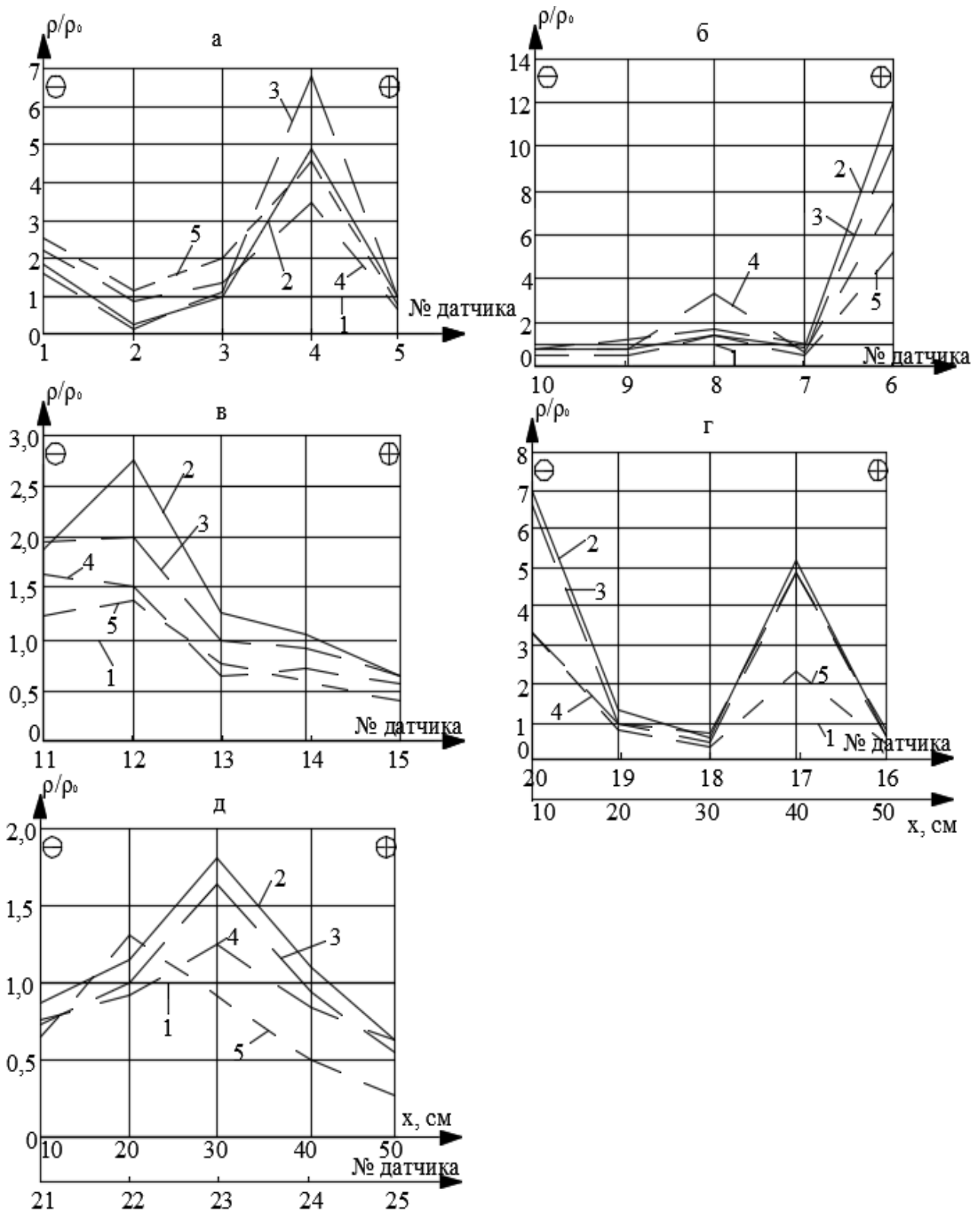


Рис. 3.25. Относительное изменение УЭС грунта при электрообработке чистого грунта (а), грунта, загрязненного отработанным маслом (б), бензином (в), отработанным маслом с обработкой растворителем (г), бензином с обработкой растворителем (д):

1 – до загрязнения; 2 – начало обработки; 3 – время обработки $t = 24$ ч; 4 – 48 ч; 5 – 168 ч

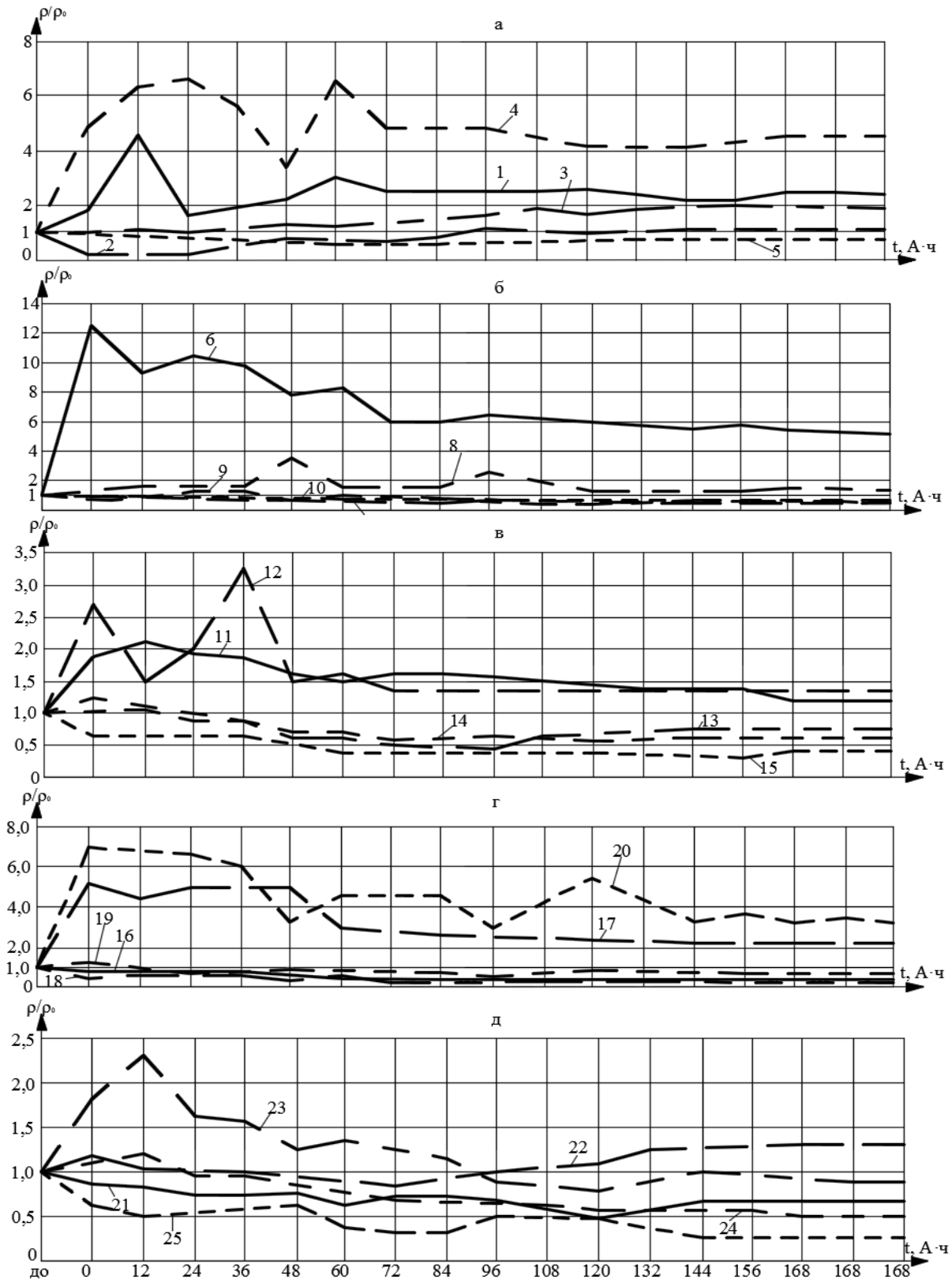


Рис. 3.26. Относительное изменение УЭС грунта при электрохимической обработке чистого грунта (а), грунта, загрязненного отработанным маслом (б), бензином (в), отработанным маслом с обработкой растворителем (г), бензином с обработкой растворителем (д) в зависимости от токорасхода:
1 – 25 – номера микродатчиков (см. рис.3.20)

Из приведенных результатов эксперимента следует, что электроосмотические процессы в приэлектродных областях, оцениваемые по величине УЭС, при обработке чистого, загрязненного нефтепродуктом грунта и разжижение растворителем загрязненного нефтепродуктом грунта взаимосвязаны, но имеют при этом существенные отличия, обусловленные различием электропроводящих свойств порозаполняющего водного раствора с низким УЭС и нефтепродуктов в виде бензина, отработанного масла и растворителя с ярко выраженными диэлектрическими свойствами, которые в свою очередь обладают различной вязкостью.

Вместе с тем, высокая разрешающая способность электрофизического мониторинга при данной схеме измерений позволяет существенно детализировать процессы, происходящие в зоне электрообработки и в приэлектродных областях.

Основные результаты анализа приведенных графиков сводятся к следующему:

- в незагрязненном грунте (рис. 3.25 а) происходит постепенное перемещение влаги от катода к аноду (электроосмос), сопровождающееся уменьшением УЭС в месте сосредоточения влаги и увеличением УЭС в зоне электроосушения, при этом прианодная зона осушения по протяженности в два раза превышает зону влагонасыщения, формирование указанных зон происходит достаточно быстро, через 24 ч с момента начала электрообработки;
- в загрязненном отработанным маслом грунте (рис. 3.25 б) также происходит поступательное перемещение жидкостей, сопровождающееся изменениями УЭС, при этом на аноде формируется зона скопления нефтепродукта, о чем свидетельствует значительное увеличение УЭС около положительного электрода; около катода формируется зона с пониженным УЭС, что свидетельствует об уменьшении в прикатодной зоне концентрации нефтепродукта и увеличении количества влаги, которая обладает более низким электросопротивлением;
- в загрязненном бензином грунте (рис. 3.25 в) происходит постепенное изменение УЭС, при этом на катоде формируется зона скопления бензина, о чем свидетельствует постепенное увеличение УЭС, но к концу электрообработки УЭС снижается, что может быть связано с поступлением влаги к отрица-

тельному электроду; около анода формируется зона с пониженным УЭС, что свидетельствует об уменьшении в этой зоне концентрации нефтепродукта;

- при подаче растворителя на анод жидкость распространялась в массив и скапливалась на катоде, при этом наблюдалось понижение электросопротивления в месте разжижения загрязнителя и распространения растворителя; так, в загрязненном отработанным маслом грунте (рис. 3.25 г) происходит постепенное перемещение влаги от катода к аноду в первом периоде обработки без растворителя, что приводит к снижению УЭС на положительном электроде и увеличению – на отрицательном электроде, но после добавления растворителя в поровом пространстве происходит смешивание жидкостей (влаги, растворителя и загрязнителя), что ведет к уменьшению УЭС в зонах скопления разжиженного раствора и увеличению в зонах массива, где процесс разжижения по причине отсутствия растворителя не произошел; около катода после добавления растворителя происходит постепенное снижение УЭС, что свидетельствует о направлении течения растворителя в сторону отрицательного электрода;

- в загрязненном бензином грунте (рис. 3.25 д) происходит скопление влаги и испарение бензина около электродов в первом периоде обработки без растворителя, что приводит к снижению УЭС около электродов, а после добавления растворителя этот процесс еще в большей степени активизируется, тем самым около электродов формируются зоны с пониженным УЭС вследствие скопления разжиженной массы загрязнителя и уменьшения концентрации нефтепродукта, внутри же массива УЭС увеличивается из-за отсутствия там растворителя в необходимом объеме и оттока влаги из межэлектродного пространства к электродам; снижение УЭС на отрицательном электроде свидетельствует о том, что около катода формируется зона скопления разжиженного загрязнителя; это подтверждается визуально следами нефтесодержащей жидкости в дренажных отверстиях электрода и частичным ее испарением;

- описанные выше процессы происходят монотонно, без резких скачков и экстремальных изменений практически во всех точках геоконтроля (рис. 3.26).

Более подробно данные результаты описаны в работах [105, 106].

Для электрофизического диагностирования зоны загрязнения во время эксперимента был проведен комплекс измерений по определению размера и местоположения зоны загрязнения. Для этого выполнено зондирование с поверхно-

сти по четырехэлектродной схеме и профилирование с помощью георадара «ОКО-2». Для реализации четырехэлектродного метода зондирования с поверхности земли в грунт забивали металлические питающие электроды, изготовленные из арматуры длиной 0,8 м, диаметром 20 мм, заостренные с одной стороны. Для определения зоны загрязнения зондирование и профилирование были проведены до загрязнения на чистом грунтовом массиве и после его искусственного загрязнения нефтепродуктами. При интегральной схеме зондирования в качестве измерительных электродов использовали трубчатые электроды-инъекторы основной установки. Измерения проводили каротажным прибором КП-2. Георадиолокационное зондирование осуществлялось георадаром «ОКО-2» с антенным блоком с центральной частотой $f = 250$ МГц. Схема геофизических профилей включала один продольный (Пр.4) и три поперечных профиля (Пр.1-3) (рис. 3.27).

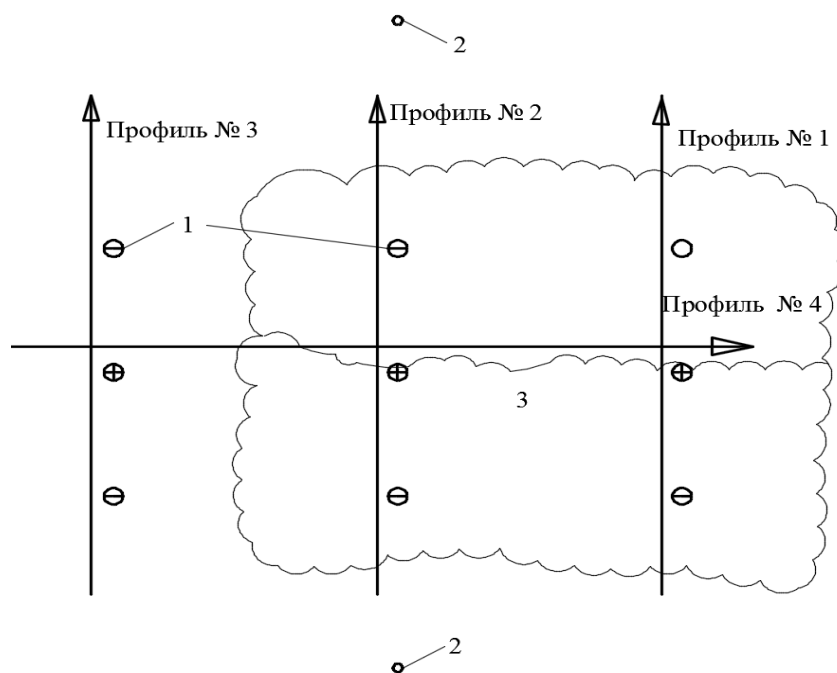


Рис. 3.27. Схема геофизических профилей:

1 – Электроды-инъекторы; 2 – заземляющие и питающие электроды;
3 – зона нефтезагрязнения

Результаты георадиолокации по поперечным профилям №1-3 представлены в форме радарограмм (сверху – до загрязнения грунта, снизу – после) (рис. 3.28). Сопоставление верхних и нижних радарограмм показывает, что контур 2 границы зоны загрязнения соответствует участку радарограммы с ослабленными горизонтальными линиями синфазности 1 (профили №1 и №2). На профиле №3 аномалии не зафиксированы. Размеры аномальных зон по ра-

дарограммам: по ширине 2-2,4 м; по глубине 1,5-1,8 м. Данные размеры в целом соответствуют ширине и глубине зоны искусственно загрязненного массива, определенным визуально.

Параллельно с георадиолокацией проводилось электрическое зондирование по классической и интегральной схемам. На рис. 3.29 приведены результаты вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и электропрофилирования (ЭП) с шагом $\Delta x = 1$ м. Зона загрязнения нефтепродуктами диагностирована по локальным положительным аномалиям эффективного УЭС ρ_k . По графикам ЭП (рис. 3.29 а) интервал этой зоны составил $x = (-4) - 0$ м, по графикам ВЭЗ (рис. 3.29 б) интервал глубин $h = 1-2,4$ м. После электрообработки зафиксировано уменьшение размеров и смещение этих зон на интервалы $x = (-1) - 1$ м и $z = 0,5-1,3$ м. Определенные расхождения в результатах мониторинга методами георадиолокации и электрического зондирования вызваны их различной физической основой, частотой электрического поля и разрешающей способностью.

Интегральные значения эффективного УЭС в пределах аномальной зоны при профилировании и зондировании составили:

	До загрязнения	После загрязнения	После обработки
$I_{px}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	13,1	21,2	17,3
$I_{pz}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	14,1	22,3	16,7

Приведенные данные свидетельствуют о высокой информативности электрофизического метода при диагностировании загрязненных зон.

Для мониторинга количественных показателей состояния грунтового массива проведены измерения эффективного УЭС ρ_k массива в межэлектродном пространстве между соседними электродами-инъекторами (см. рис. 3.27). На рис. 3.30 приведены графики изменения относительных значений ρ_k/ρ_{k0} от времени t в процессе электрообработки. Из графиков следует, что на интервале $t = 48-72$ ч происходит закономерное снижение УЭС в 2-5 раз при всех схемах обработки, обусловленное изменением структурных параметров грунтов (пористости и гранулометрического состава), в дальнейшем на всех графиках наблюдается монотонное повышение уровня ρ_k , связанное с общим снижением влажности. Следует отметить, что при использовании растворителя (графики 4 и 5), разжижающего нефтепродукт в порах, динамика описанных процессов значительно менее выражена, поскольку при этом усиливается электроосмотический эффект и снижается термокоагуляционный эффект электрообработки.

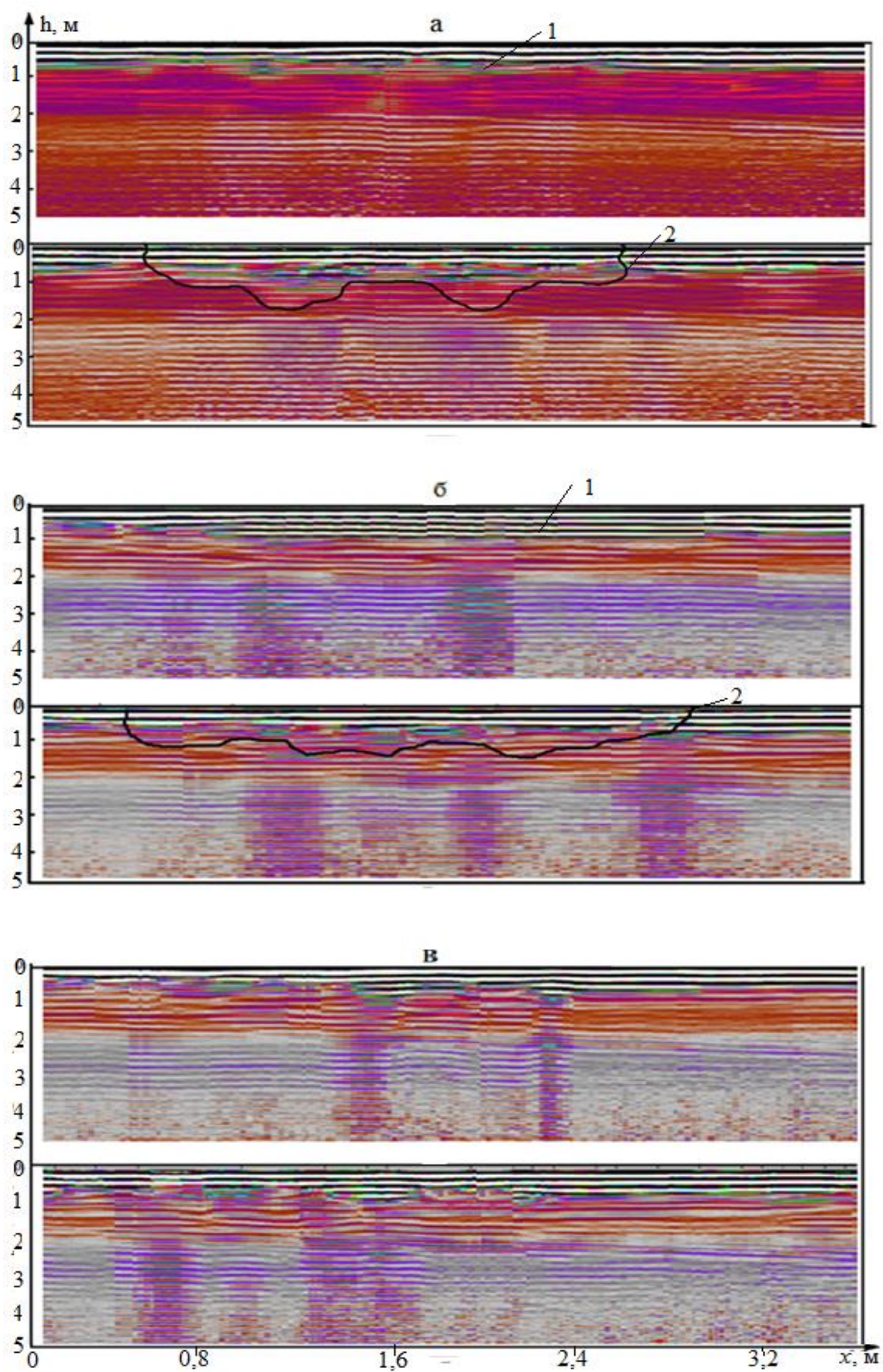


Рис. 3.28. Радарограмма до (сверху) и после загрязнения грунта по профилям №1 (а), №2 (б) и №3 (в):
1 – линия синфазности; 2 – граница зоны загрязнения

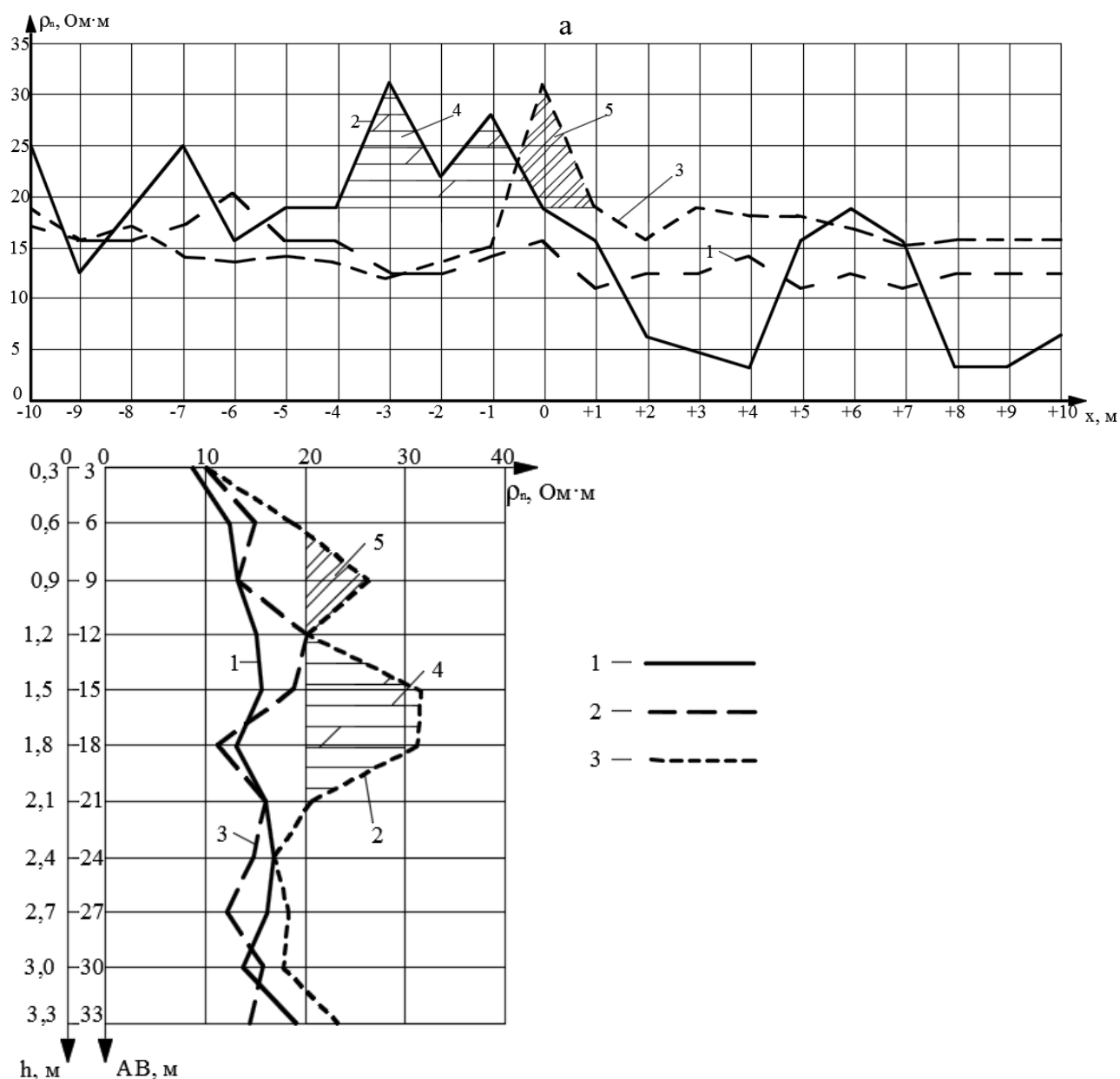


Рис. 3.29. Результаты электропрофилирования (а) и зондирования (б) по оси установки (Пр. №4) с шагом 1 м:

- 1 – до загрязнения; 2 – после загрязнения; 3 – после электрообработки;
 4 – расположение аномальной зоны до обработки;
 5 – расположение аномальной зоны после обработки

Для перехода к численным значениям коэффициента загрязнения были использованы ранее полученные при обработке данных лабораторных исследований четыре расчетные зависимости: линейная, логарифмическая, параболическая и экспоненциальная. Постоянные a_1 - a_4 определены при известном начальном коэффициенте загрязнения $k_0 = 7\%$ равном отношению объема загрязнителя к объему загрязненного грунта. По уравнениям, приведенным в табл. 3.10

был найден коэффициент загрязнения k в каждый момент времени замера эффективного УЭС.

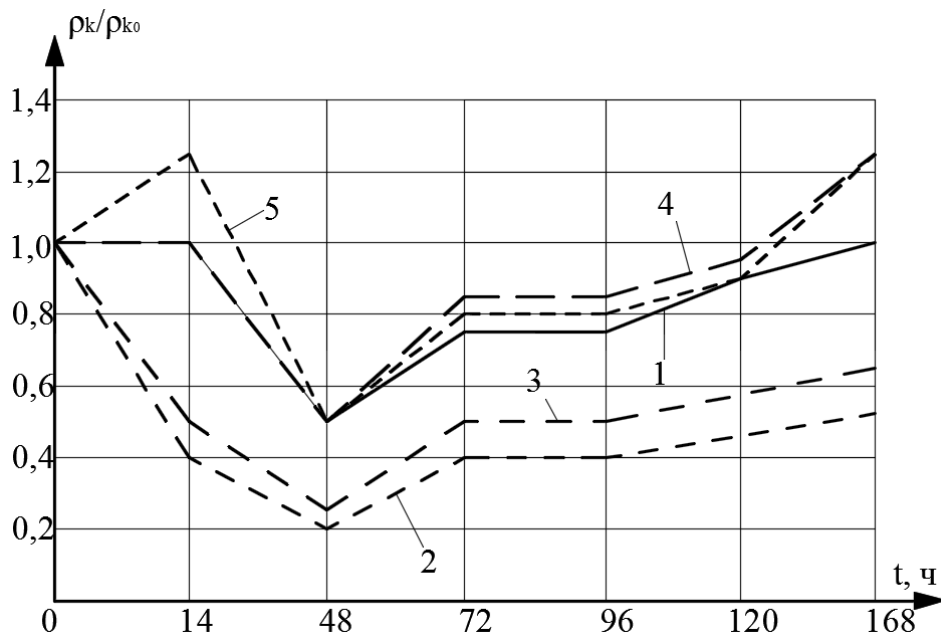


Рис. 3.30. График изменения во времени t относительного эффективного электросопротивления при электрическом зондировании:

1 – чистый глинистый массив; 2 – загрязненный отработанным маслом массив; 3 – загрязненный бензином массив; 4 – загрязненный отработанным маслом массив с обработкой растворителем; 5 – загрязненный бензином массив с обработкой растворителем

Таблица 3.10

Зависимость коэффициента загрязнения k от относительного изменения эффективного электросопротивления грунта в образце

Уравнение	Значение постоянной a при загрязнении		Значение k		
			начальное $k_0, \%$	конечное $k_k, \%$	
	маслом	бензином		масло	бензин
$k = a_1 \cdot \frac{\rho_k}{\rho_{k0}}$	$a_1=2,8$	$a_1=3,5$	7	3,64	4,55
$k = a_2 \cdot \ln\left(\frac{\rho_k}{\rho_{k0}}\right)$	$a_2=7,64$	$a_2=10,1$		2	2,65
$k = a_3 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_{k0}}\right)^2$	$a_3=1,12$	$a_3=1,75$		1,9	2,96
$k = a_4 \cdot \exp\left(\frac{\rho_k}{\rho_{k0}}\right)$	$a_4=0,575$	$a_4=0,95$		2,11	3,49

На рис. 3.31 представлено изменение коэффициента загрязнения (концентрации нефтепродукта) во времени. Из графиков следует, что коэффициент за-

загрязнения k_3 с течением времени уменьшается до момента $t = 48-72$ ч, а затем стабилизируется. Момент стабилизации расчетного значения k является объективным критерием прекращения электрообработки, поскольку дальнейшее воздействие на массив не дает существенного положительного эффекта.

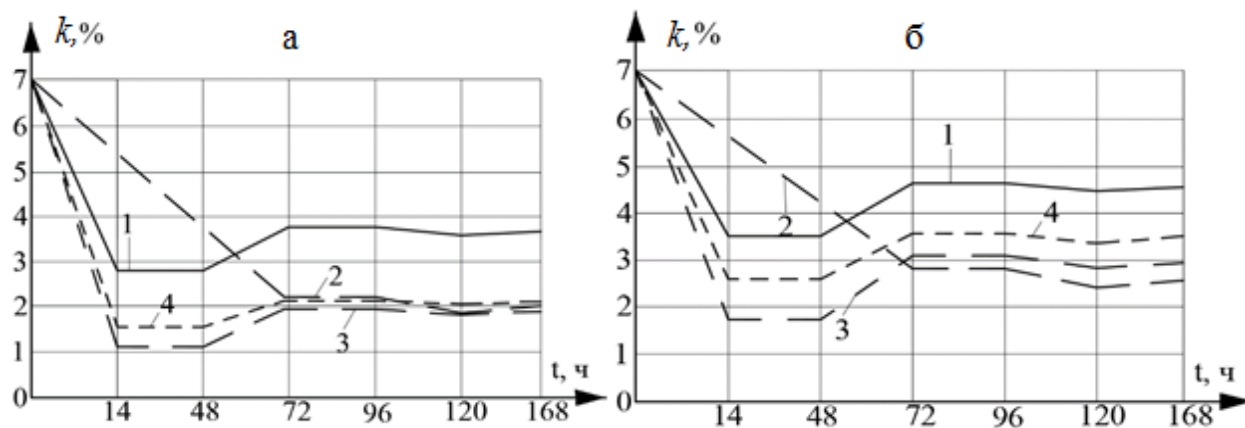


Рис. 3.31. Графики изменения концентрации отработанного масла (а) и бензина (б) при электрообработке в зависимости от времени t :

- 1 – линейная зависимость; 2 – логарифмическая зависимость;
3 – параболическая зависимость; 4 – экспоненциальная зависимость

Анализ полученных результатов позволил установить следующее.

1. Георадиолокация и электрическое зондирование с земной поверхности обеспечивают диагностирование расположения и размеров зоны нефтезагрязнения с точностью до 0,1-0,5 м.

2. Электрическое зондирование обеспечивает интегральный контроль изменения свойств грунта в процессе обработки, а в комплексе с ранее установленными корреляционными зависимостями – усредненную оценку изменения коэффициента загрязнения. Установлено, что через 48-72 ч после начала обработки эффективное УЭС массива стабилизируется, и дальнейшее воздействие становится малоэффективным. По данным электрофизического контроля в результате эксперимента степень загрязнения массива отработанным маслом снизилась с начальных 7 до 2-3,6%, а при загрязнении бензином – с 7 до 2,6-4,5%. Дополнительное разбавление вязких нефтепродуктов введением в электроды растворителя в диапазоне коэффициента загрязнения до 7% не приводит к заметному положительному эффекту.

Более детально изложенные результаты представлены в работах автора [112-114].

Выводы

Изложенные в данной главе результаты лабораторных и натурных экспериментальных исследований позволили сделать следующие выводы.

1. На одномерной физической модели цилиндрической формы с плоскими электродами при обработке в однородном электрическом поле подтверждено, что вследствие электрической контрастности водного раствора и нефтезагрязнителя применение микродатчиков УЭС позволяет контролировать перемещение жидкостей в зоне электрообработки. Установлено, что в чистом грунте перемещение природной влаги происходит в сторону анода, вызывая уменьшение уровня УЭС, при наличии в порах нефтепродукта он перемещается в направлении катода, при этом УЭС в точке замера возрастает. Указанные процессы происходят относительно монотонно, их интенсивность во времени зависит от вязкости загрязнителя (масло, мазут, дизельное топливо, бензин). При добавлении в один из электродов растворителя типа Гексан-Н происходит разбавление нефтепродукта, сопровождающееся скачкообразным изменением УЭС, при этом процессы осмотического движения жидкостей усиливаются. Кроме того зафиксирована общая тенденция к увеличению уровня УЭС, связанная с изменением структурно-текстурных параметров грунта при электрообработке.

Исследования образцов грунтов показали, что за счет термического воздействия электрического тока происходит связывание влаги, коагуляция нефтепродукта в порах с увеличением размеров твердых частиц грунта и их слипание. В результате этих процессов зафиксировано снижение влажности во всех точках модели, снижение плотности грунта, а также резкое снижение содержания фракций $< 0,1$ мм и увеличение содержания более крупных фракций (0,1-2,0 мм) в гранулометрическом составе.

2. Более точное приближение к натурным условиям дает объемная модель при реальных размерах установки с двумя трубчатыми электродами-инъекторами, с практически применяемыми диапазонами напряжения до 300 В и плотностью тока до 15 А/м^2 . Объем модели составил $0,15 \text{ м}^3$. Направления перемещения порозаполняющих жидкостей в объеме при неоднородном электрическом поле сохраняются: водного раствора - к аноду, а нефтепродукта - к катоду, при этом вероятно волнообразное развитие процессов, т. к. вязкость нефтепродукта выше, чем у воды. В приэлектродных областях с наибольшей

плотностью тока имеет место анизотропия УЭС на интервале $r \geq 90$ мм, которая при $r = 150$ мм сглаживается, а при токорасходе $I \cdot t > 50$ А·ч вследствие термического высушивания и консолидации грунта величина УЭС возрастает.

Установлены количественные диапазоны изменения физико-механических свойств загрязненного грунта: влажность снижается на 15-20%, а плотность - на 2-10% как в сухом, так и во влажном состоянии. В результате коагуляции нефтепродукта на поверхности частиц породы и их слипание происходит уменьшение содержания фракций $< 0,1$ мм в 2-5 раз, а увеличение содержания фракций 0,1 мм на 30-63%. Особенно интенсивно процесс изменения гранулометрического состава грунта происходит в прианодной зоне.

Дополнительное введение в электроды-инъекторы активного вещества-растворителя Гексан-Н приводит к разжижению нефтепродукта и его перемешиванию в порах с естественной влагой, что нарушает монотонность процессов изменения УЭС в прикатодной области, где происходит дополнительное скопление жидкого нефтепродукта, и замедляет интенсивность консолидации грунта в прианодной области. Особенно резко это проявляется при грунтах, загрязненных более вязким отработанным маслом.

Проведенные после завершения обработки извлечение и визуальный осмотр грунта подтвердили результаты геологического и геофизического мониторинга: образование уплотненного грунта с характерным темным оттенком в прианодной области и рыхлого грунта естественного цвета с пятнами нефтепродукта в прикатодной.

3. Натурные исследования, проведенные на полигоне ООО «НООЦЕНТР», полностью соответствовали реальным схемам электрохимической обработки загрязненных грунтов по количеству электродов, глубине и интервалу их установки, токовому режиму и продолжительности обработки. Испытаны все ранее примененные в лабораторных условиях виды обработки и различные по вязкости виды загрязнителей. Дополнительно к ранее применявшимся методам инженерно-геологических изысканий и микродатчиков УЭС применялись интегральные геофизические методы электрического зондирования на постоянном токе и георадиолокации. Принципиальное отличие условий натурального эксперимента от лабораторного состояло в том, что опытный участок массива физически не изолирован от прилегающих грунтов и атмосферы.

В целом результаты исследований образцов и измерений микродатчиками УЭС подтвердили результаты лабораторных экспериментов, характеризующие

закономерности изменения физических свойств грунтов в прикатодной и прианодной областях, однако количественно диапазоны изменения свойств изменились, что связано с дополнительным поступлением влаги из прилегающих грунтов и атмосферы. Так, диапазон уменьшения влажности составил 3-6%, а плотности 3-7 %, содержание частиц с размером $< 0,1$ мм уменьшилось в зависимости от вида загрязнителя от 1,15 до 1,61 раза. Визуально в результате вскрытия подтверждено формирование уплотненной прианодной зоны и скопления остаточного нефтепродукта.

Георадиолокационное и электрические зондирование проводили по одному продольному и трем поперечным профилям. На радарограммах загрязненные нефтепродуктами участки шириной 2-2,4 м и глубиной до 1,5-1,8 м характеризуются ослаблением горизонтальных линий синфазности. На графиках электропрофилирования (ЭП) и вертикального зондирования (ВЭЗ) данные зоны диагностируются по повышенным значениям эффективного УЭС ρ_k , при этом величины интегральных значений ρ_k до, после загрязнения и после обработки составили: для схемы ЭП соответственно 13.1, 21.2, 17.3 Ом·м; для схемы ВЭЗ - 14,1, 22,3, 16,7 Ом·м.

Позонный мониторинг изменений ρ_k , когда в качестве измерительных использовали электроды-инъекторы, показал, что на интервале времени обработки $t = 48-72$ ч происходит монотонное снижение ρ_k в 2-5 раз при всех загрязнителях и схемах обработки, обусловленное миграцией и коагуляцией загрязнителя, увеличением пористости, поступлением влаги из прилегающих грунтов и атмосферы. С использованием ранее исследованных регрессивных зависимостей получено, что расчетный коэффициент загрязнения в результате обработки уменьшается от известного начального значения $k = 7$ до 2-3,6 % при загрязнении отработанным маслом и до 2,6-4,5% - при загрязнении бензином.

Установленные закономерности изменения физических и электрических свойств грунтов при электрообработке позволили перейти к разработке методик геолого-геофизического мониторинга при управлении режимами электрохимической очистки загрязненных грунтов.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРООБРАБОТКИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВ

4.1. Разработка методик электрофизического диагностирования зон нефтезагрязнений

Для обоснования наиболее эффективных параметров технологии очистки грунта от загрязнителя проводят оценку начального и остаточного загрязнения. Современные методики прямой оценки содержания загрязняющего вещества в грунте, описанные в главе 1, весьма трудоемки, зачастую связаны со значительными потерями времени, отводимого на подготовку и лабораторные испытания образцов грунта.

Физической основой электрофизического мониторинга является то, что нефть и все нефтепродукты проявляют ярко выраженные диэлектрические свойства, величина удельного электросопротивления (УЭС) ρ превышает 10^6 Ом·м. Комплекс электроповерхностных явлений в поровом пространстве грунтового массива как многофазной среде, включающий твердую, жидкую и газовую компоненты, формируют зону нефтезагрязнения как зону, аномальную по электропроводности. Для мониторинга процессов в подобных аномальных приповерхностных зонах вполне применимы классические методы электроразведки и георадиолокации.

Анализ потенциальных источников загрязнения выявил объекты, на которых происходит загрязнение грунтов, в которых требуется диагностирование и определение размеров зоны загрязнения. Классификация объектов диагностирования приведена на рис. 4.1. Все объекты можно разделить на 3 группы:

- открытые – в которых имеется полный доступ к грунтовому массиву, так как эти объекты не имеют заглубленных фундаментов и других ограждающих конструкций; к ним относят передвижные АЗС, аварийные участки нефтепроводов и коммуникаций, дамбы очистных сооружений, железнодорожные станции и участки пути;

- частично открытые – объекты в которых имеется ограниченный доступ к грунтовому массиву, за счет точечных фундаментов внутри сооружения име-

ется доступ к массиву; к ним можно отнести нефтехранилища и склады ГСМ, сооружения ремонтных баз железнодорожного транспорта, автотранспорта и мех. оборудования;

- закрытые – объекты, на которых доступным грунтовый массив является только вокруг сооружения; к ним относятся стационарные АЗС, трансформаторные подстанции, резервуары.



Рис. 4.1. Объекты диагностирования – потенциальные источники нефтезагрязнений грунта

Для электрофизического диагностирования зоны загрязнения необходимо произвести комплекс мероприятий, с помощью которых будет определены размер и месторасположение зоны загрязнения. Для этого выполняют зондирование с поверхности по четырехэлектродной схеме или профилирование с помощью георадара «ОКО-2». Для реализации четырехэлектродного метода зондирования с поверхности земли в грунт забивают металлические питающие электроды, изготовленные из арматуры длиной 0,6-1 м, диаметром 15-22 мм, заост-

ренные с одной стороны. Измерения производят каротажным прибором КП-2 или разведочной аппаратурой АЭ-72 «Березка». Георадиолокационное зондирование осуществляют георадаром «ОКО-2» с антенным блоком с центральной частотой $f = 250-300$ МГц.

Основные технические характеристики прибора КП-2:

- значение стабилизированных токов I_{AB} , мА – 0,01; 0,1; 1; 10
- диапазон измеряемых падений напряжений ΔU_{MN} , мВ – 0,05-5000
- входное сопротивление на клеммах MN, не менее, МОм – 10
- ослабление помехи промышленной частоты, дБ – 60

Основные технические характеристики георадара «ОКО-2»:

- диапазон центральной частоты (для различных центральных блоков), МГц – 50-1700
- амплитуда зондирующего импульса, В – 70-700
- максимальная глубина зондирования (для сред с малым затуханием), м – 0,8-20
- разрешающая способность, м – 0,03-2
- чувствительность приемного устройства, мсВ – 300
- частота повторения затухающих импульсов, кГц – 35-400
- время непрерывной работы без подзарядки аккумуляторов, ч – 4

Схема геофизического полигона для объектов открытого типа представляет собой систему продольных и поперечных профилей с шагом от 0,5 до 5 метров в зависимости от размера участка и требуемой точности определения границы и размеров зоны загрязнения (рис. 4.2 а). Схема геофизических профилей для частично открытых объектов (рис. 4.2 б). При этом часть профилей попадает на ограждающие конструкции, либо фундаменты, в таком случае необходимо перенести данный профиль на определенное расстояние от конструкции. Схема геофизических профилей для закрытых объектов представляет собой продольные и поперечные профили, находящиеся на максимально близком расстоянии от здания или сооружения и опоясывающие данное сооружение со всех сторон (рис. 4.2 в).

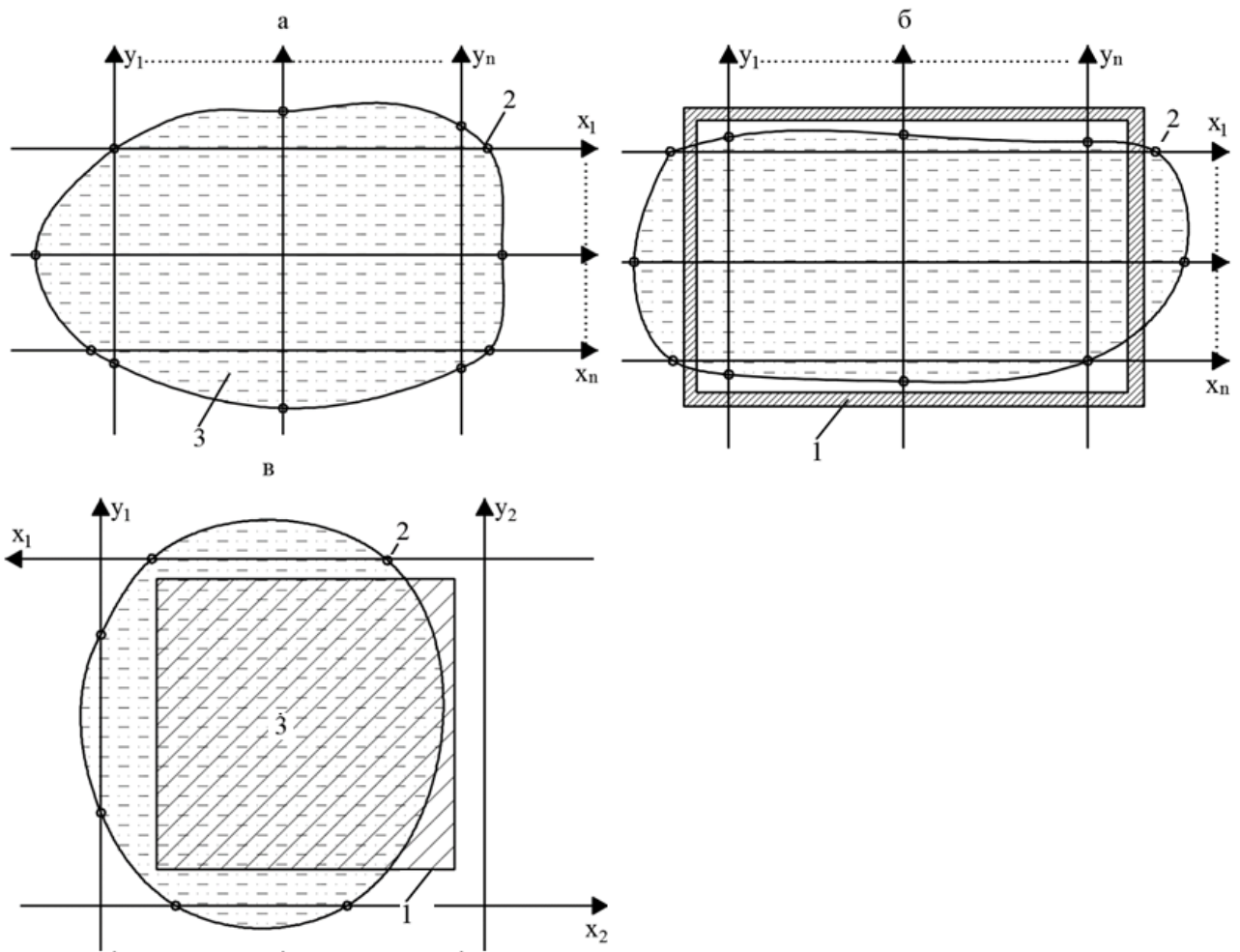


Рис. 4.2. Расположение профилей при диагностировании открытых (а), частично открытых (б) и закрытых (в) объектов: $x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_n$ – профили; 1 – сооружение; 2 – диагностированные точки границ загрязненных зон; 3 – загрязненная зона

На основе выполненного геоэлектрического контроля, георадиолокации по схемам электрического зондирования (ВЭЗ) и профилирования (ЭП) строят графики результатов ВЭЗ и ЭП. С помощью этих графиков определяют граничные точки x_k, y_k и z_k (рис. 4.3 а, б). На основе полученных результатов и определения граничных точек строят 3D модель зоны загрязнения (рис. 4.3 в).

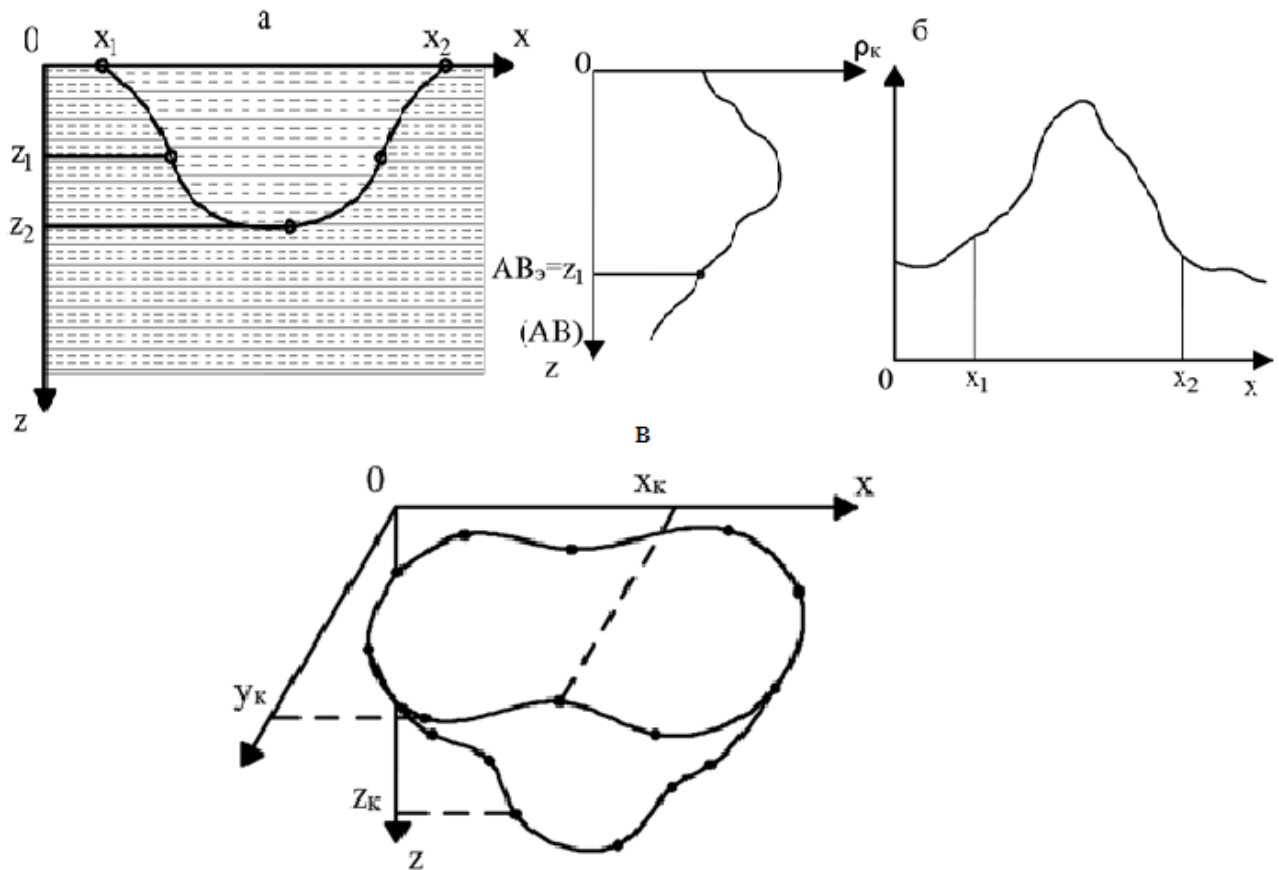


Рис. 4.3. Определение граничных точек x_k , y_k и z_k по результатам георадиолокации (а), ВЭЗ и ЭП (б), построение объемной 3D модели зоны загрязнения

Диагностирование зоны нефтезагрязнения, определение его размеров возможно с помощью методов геоэлектрического контроля, а именно с помощью георадиолокации и электроразведки с профилированием.

Функциональное назначение геофизических методов приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1

Геофизические методы диагностирования загрязненных зон

Метод диагностирования	Аппаратура	Результаты измерений	Результаты диагностирования
Георадиолокация	Георадар ОКО-2, антенные блоки	Радарограммы	Границы загрязненных зон в плане и по глубине
Электрическое зондирование и профилирование	Электроразведочная аппаратура АЭ-72 «Березка», КП-2	Графики ВЭЗ и ЭП	Границы загрязненных зон в плане и по глубине

На основе использования описанных в предыдущих разделах физических предпосылок и методов обработки результатов геофизического мониторинга диагностирование зоны загрязнения и определение способа очистки грунтового массива выполняют по алгоритму, приведенному на рис. 4.4.



Рис. 4.4. Алгоритм диагностирования зон нефтезагрязнений

Алгоритм включает в себя следующие элементы:

- определение, к какому типу объекта относится сооружение в районе обследуемой зоны;

- назначение профилей, выбор величины шага и длины профилей, расположение профилей относительно объекта;
- выполнение работ по георадиолокации;
- определение глубины зоны нефтезагрязнения с помощью опорных точек z_n и эффективного разноса по результатам ВЭЗ по выбранным профилям;
- определение размера зоны в плане с помощью опорных точек x_n, y_n по результатам ЭП по выбранным профилям;
- по полученным данным опорных точек x_n, y_n, z_n ведется построение объемной 3D модели зоны загрязнения;
- определение степени загрязнения и интегрального показателя загрязнения k с помощью программы для ЭВМ по результатам ВЭЗ и ЭП или экспресс-прогнозу с использованием эмпирической зависимости по среднему или интегральному значению эффективного УЭС;
- назначение метода очистки грунтового массива по виду объекта и производство работ по очистке.

Для открытых объектов технически целесообразно и экономически наиболее эффективно использование выемки загрязненного грунта для его дезактивации. Для частично открытых и закрытых объектов экономически эффективна и целесообразна электрохимическая очистка непосредственно около сооружения или под ним без извлечения грунта.

4.2. Разработка методик и схем контроля процессов электрохимической очистки грунтов

Материалы диссертации доказывают, при обработке малопроницаемых глинистых грунтов весьма перспективен метод электрохимической очистки, основанный на комплексном воздействии активным веществом и электрическим током. При такой обработке необходимо производить физико-технический контроль состояния массива для сокращения сроков обработки и снижения энергозатрат.

Для контроля процессов электрохимической очистки грунтов рекомендовано применение геолого-геофизического мониторинга, составными элемента-

ми которого являются электрофизический мониторинг, инженерно-геологические изыскания и метод инфракрасной спектрофотометрии (табл. 4.2).

Для измерения электрофизических параметров следует использовать две схемы зондирования с земной поверхности: для частично открытых объектов и для закрытых объектов. Для реализации четырехэлектродного метода зондирования с поверхности земли в грунт за пределами обрабатываемого участка заземляют стандартные металлические питающие электроды, а в качестве измерительных используют электроды-инъекторы. Расположение электродов-инъекторов и питающих электродов показано на рис. 4.5 для частично открытых и закрытых объектов.

Измерения электрофизических свойств проводились прибором КП-2. По результатам контроля строили графики изменения УЭС ρ вдоль основной оси установки электрообработки и в зависимости от токорасхода.

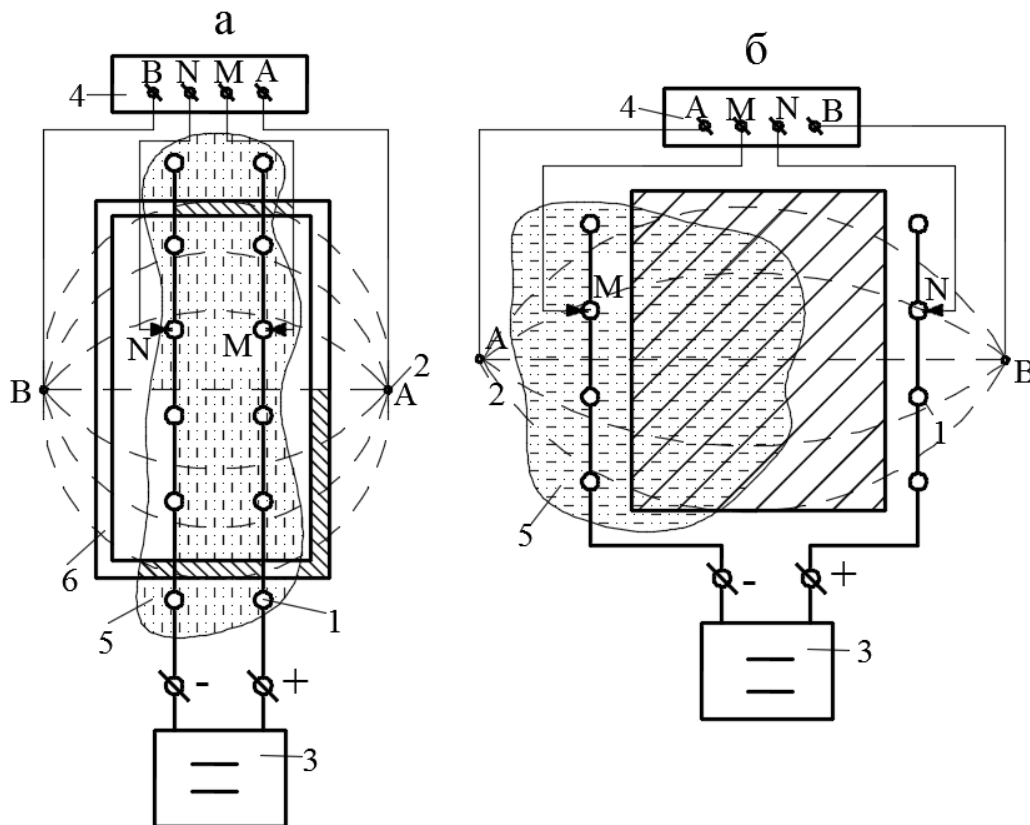


Рис. 4.5. Схемы контроля процессов электрообработки для частично открытых (а) и закрытых (б) объектов:

1 – зона загрязнения; 2 – питающие электроды А, В; 3 – электросиловая установка; 4 – электроразвешивочная аппаратура; 5 – зона загрязнения; 6 – сооружение

Основой мониторинга является электрофизический метод контроля, который обеспечивает определение момента окончания электрообработки, а также расчет коэффициентов загрязнения. Параллельно для контрольных замеров влажности, пористости и гранулометрического состава необходимо выполнить инженерно-геологические изыскания с помощью полевой лаборатории. Контрольные замеры содержания нефтепродуктов в образцах грунта возможно выполнить с помощью метода инфракрасной спектрофотометрии.

Таблица 4.2

Комплекс геолого-геофизических методов контроля

Метод контроля	Аппаратура	Результат контроля
Электрофизический мониторинг	Электроразведочная аппаратура «Березка», КП-2	Определение момента завершения электрообработки t_3 . Расчетные значения коэффициентов загрязнения k до и после обработки
Инженерно-геологические изыскания	Полевая лаборатория ПЛЛ-2	Контрольные замеры влажности, пористости и гранулометрического состава до и после обработки
Инфракрасная спектрофотометрия	Концентратомер КН-2 Установка для очистки четыреххлористого углерода Колонка хроматографическая	Контрольные замеры содержания загрязнителя до и после обработки

Основным используемым силовым оборудованием при электрохимической обработки грунтов является источник постоянного электрического тока, подбираемый в зависимости от потребляемой мощности, силы тока, напряжения, причем диапазон регулирования напряжения составляет от 20 до 200 В, а максимальный ток нагрузки может превышать 200 А. Технология закрепления грунтов предусматривает необходимость перемещения оборудования и размещения его на площадке ограниченных размеров, поэтому очень важным техническим параметром оборудования являются также его габаритные размеры. Поскольку электроды-инъекторы заземляются, для исключения срабатывания защиты от замыкания на землю необходимо обязательное подключение к источнику напряжения через трансформатор соответствующей мощности.

Ранее для получения постоянного электрического тока использовались вращающиеся электрические машины, а также преобразователи электромашин-

ного типа на основе ионных (главным образом, ртутных) вентилях. В современных устройствах их заменяют полупроводниковыми выпрямителями с высокими энергетическими характеристиками, малыми размерами, большой эксплуатационной надежностью и высоким КПД, они просты по конструкции и обслуживанию. Выпрямители с полупроводниковыми управляемыми вентилями (тиристоры) кроме выпрямления электрического тока обеспечивают простое и удобное регулирование выпрямленного напряжения в широких пределах.

В КузГТУ по заказу ОАО «Кузниишахтострой» разработана электросиловая установка, предназначенная для электрообработки песчано-глинистых неустойчивых грунтов на строящихся и действующих горнодобывающих предприятиях Кузбасса.

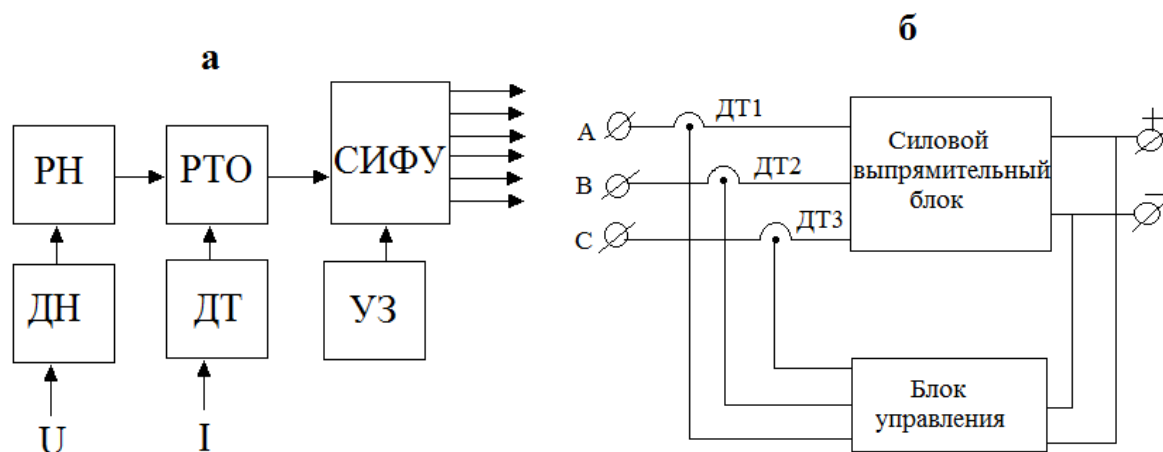


Рис. 4.6. Структурные схемы тиристорного преобразователя (а) и блока управления электросиловой установки (б): ДТ-1, ДТ-2, ДТ-3 – датчики тока; А, В, С – фазы питающей сети от трансформатора; U, I – напряжение и ток сети; U1-U6 – импульсы управления на тиристоры силового блока; РН – Регулятор напряжения; РТО – регулятор токовой отсечки; СИФУ – система импульсно-фазового управления; УЗ – узел защиты; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока

Схема агрегата включает следующие основные конструктивные модули: силовой трансформатор; модуль тиристорного выпрямителя, состоящий из трех пар тиристоров, образующих трехфазную мостовую схему выпрямления, и блок управления тиристорами (рис. 4.6).

Блок управления конструктивно выполнен на одной панели, на которой расположены функциональные узлы: система импульсно-фазового управления СИФУ; регулятор напряжения РН; блок питания БП; датчик напряжения ДН; узел защиты УЗ.

Общий вид блока управления показан на рис. 4.7.



Рис. 4.7. блок управления электросиловой установки (фото)

Технические характеристики установки КузГТУ

- напряжение и частота питающей сети - 380 В, 50 Гц;
- число фаз - 3;
- величина регулируемого выпрямленного напряжения в режиме стабилизации - 0 – 265 В при нагрузке 80 А, 0 – 380 В при нагрузке 40 А;
- постоянство установленного выпрямленного напряжения при изменении нагрузки от 4 до 40 А в диапазоне напряжений от 260 до 380 В и от 4 до 80 А в диапазоне напряжений от 220 до 260 В - $\pm 2\%$;
- номинальный ударный ток короткого замыкания - не более 8 кА;

- номинальный кратковременно выдерживаемый ток короткого замыкания - не более 6,3 кА;

- номинальный условный ток короткого замыкания, при котором должна сработать защита аппарата - 1,6 кА;

- КПД - не менее 92%.

Алгоритм контролируемой электрохимической очистки грунта от загрязнений нефтепродуктами включает следующие операции (рис. 4.8):

- на электросиловой установке должны быть установлены расчетные значения напряжения U_0 и силы тока I_0 ;

- с помощью амперметра и вольтметра на электросиловой установке производят контроль параметров установки – изменение напряжения U и силы тока I во времени;

- методом интегрального геофизического мониторинга контролируют эффективное электросопротивление ρ_k (см. рис. 4.5);

- если величина силы тока I не изменяется, то следует продолжить электрообработку грунта, при уменьшении I необходимо увеличить напряжение U до такого значения, чтобы она приобрела начальное значение;

- силу тока I также возможно увеличить путем увлажнения приэлектродных зон, если при этом I увеличивается, то обработка продолжается, продолжают контролировать эффективное УЭС ρ_k ;

- если эффективное электросопротивление ρ_k уменьшается, то следует продолжить обработку, если величина ρ_k перестала изменяться и все меры по увеличению силы тока I исчерпаны, то следует прекратить обработку;

- по завершении обработки производят определение конечного значения коэффициента загрязнения;

- контрольные замеры влажности, пористости, гранулометрического состава и содержания загрязнителя.

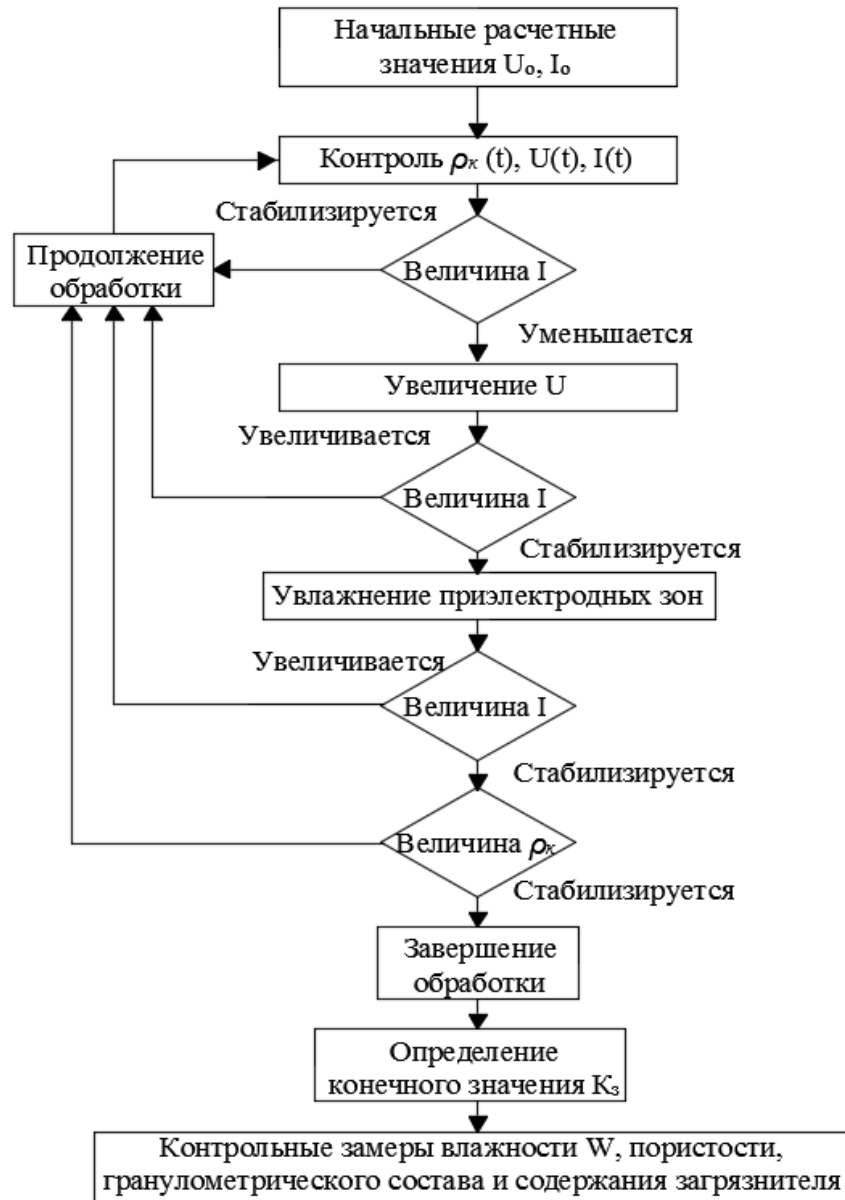


Рис. 4.8. Алгоритм контролируемой электрохимической очистки грунта от загрязнений нефтепродуктами

4.3. Технико-экономическое обоснование внедрения разработок

Применение разработок направлено на повышение экологической безопасности ведения горных работ.

Основная технико-экономическая эффективность заключается в экономии расхода электроэнергии за счет более точного определения момента окончания электрообработки. По самым пессимистичным оценкам таким образом можно сэкономить не менее 20% электроэнергии. Для технико-экономического

обоснования воспользуемся результатами натурных испытаний на полигоне ООО «НООЦЕНТР» (см. рис. 3.22).

Учитывая среднее значение напряжения ($U=280$ В), и среднее значение силы тока ($I=22$ А) за время электрообработки ($t=168$ ч), можно рассчитать расход электроэнергии для данного объема испытаний ($V_0=12$ м³):

$$Q_0 = U \cdot I \cdot t = 280 \cdot 22 \cdot 168 = 1034,88 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где Q_0 – расход электроэнергии, затраченной на обработку участка объемом 12 м³.

Расход электроэнергии для среднестатистического участка объемом $V_1 = 200$ м³ будет равен:

$$Q_1 = Q_0 \cdot \frac{V_1}{V_0} = 17247,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Средняя стоимость 1 кВт·ч $T = 4,2$ руб. Отсюда можно вычислить стоимость электроэнергии, затраченной на участок объемом 200 м³:

$$C = Q_1 \cdot T = 72441 \text{ руб.}$$

Таким образом можно рассчитать экономический эффект:

$$\mathcal{E} = 0,2 \cdot C = 14488 \text{ руб.}$$

Результаты расчета сведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Результаты расчета экономической эффективности

Объем грунта, м ³	Расход электроэнергии, кВт·ч	Стоимость 1 кВт·ч, руб	Экономия электроэнергии, кВт·ч	Экономический эффект, руб
200	17247,9	4,2	3449,4	14488

Таким образом, снижение затрат на электроэнергию на среднестатистическом объекте составит более 14,0 тыс. руб.

Основной эффект от внедрения разработок заключается в создании системы оперативного мониторинга, обеспечивающий оценку состояния и восстановление природно-технических систем при разработке месторождений.

Выводы

1. Объекты - потенциальные источники нефтезагрязнений грунта по возможностям диагностирования зон загрязнения следует разделять на открытые (аварийные участки нефтепроводов и коммуникаций, передвижные АЗС, дамбы очистных сооружений, железнодорожные станции и участки пути), частично открытые (сооружения ремонтных баз, хранилища и склады ГСМ, котельные), закрытые (стационарные АЗС, трансформаторные подстанции, резервуары). Для каждого из видов объектов назначается специальная система профилей георадиолокационного и электрического зондирования, по результатам которых определяют опорные точки и строят объемную модель зоны нефтезагрязнения. Согласно предложенному алгоритму по величине интегрального показателя загрязнения k принимают решение о выемке грунта для дезактивации (для объектов открытого типа) или его электрохимической обработке без выемки (для объектов частично открытого или закрытого типа).

2. Оперативный контроль процессов электрообработки грунтовых оснований объектов частично открытого и закрытого типа ведут по схеме интегрального электрического зондирования с использованием в качестве измерительных электродов-инжекторов, для конечных контрольных измерений используют полевую лабораторию для испытаний грунтов и аппаратуру инфракрасной спектрофотометрии. Максимальное использование возможностей электросиловой установки обеспечивается увеличением напряжения обработки и увлажнением приэлектродных зон, при этом моменты регулировки или прекращения обработки определяют по стабилизации величины эффективного УЭС зоны электрообработки. Для практической реализации алгоритма контролируемой электрохимической очистки от нефтезагрязнений целесообразно использовать разработанную в КузГТУ мобильную установку, включающую тиристорный преобразователь и блок управления, обеспечивающий регулировку напряжения до 380 В при токовой нагрузке до 80 А.

3. Техничко-экономическая эффективность разработанного методического обеспечения технологии контролируемой электрохимической очистки грунтов от загрязнений нефтепродуктами обусловлена экономией трудозатрат и расхода электроэнергии не менее, чем на 20 % за счет максимального использования

возможностей силовой электроустановки и более точного определения момента окончания электрообработки. За счет снижения расхода электроэнергии при обработке грунтового массива объемом 200 м^3 экономия составит более 14,0 тыс. руб.

Заключение

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача установления взаимосвязи электропроводности пористых влагонасыщенных грунтов с содержанием в них нефтепродуктов, обоснования и разработки на этой основе метода оперативного мониторинга степени загрязнения грунтов нефтепродуктами и их очистки, что имеет важное значение для оценки и обеспечения экологической безопасности природно-технических систем при освоении месторождений полезных ископаемых.

Основные научные и практические результаты исследований.

1. Физической основой способов электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами является зависимость удельного электрического сопротивления (УЭС) трехфазной среды от пористости, влажности и УЭС порового заполнителя, рассчитываемого по формуле гармонического средневзвешенного, при этом для условий Кузбасса диапазоны изменения параметров структуры порового пространства и смачиваемости составляют соответственно $\beta = 1,3-2,2$ и $\gamma = 1,8-3,3$. На основе экспериментально установленных диапазонов изменения УЭС водного раствора ($\rho_{\text{в}} = 0,2-80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и основных видов нефтепродуктов (топливо, моторные масла) ($\rho_{\text{н}} = (0,2-1,1) \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), рассчитаны базы данных зависимости эффективного УЭС среды $\rho_{\text{к}}$ от соотношения объемных долей нефтепродукта и влаги в диапазоне $V_{\text{н}}/V_{\text{в}} = 0-20$.

2. Для автоматизации расчета локального коэффициента загрязнения k разработан алгоритм, включающий подбор величин структурных параметров β и γ , обеспечивающих минимальное отклонение расчетных данных от измеренных, и определение k по соотношению эффективного УЭС $\rho_{\text{к}}$ внутри аномальной зоны и за ее пределами $\rho_{\text{к0}}$. Повышение точности оценки степени загрязнения обеспечивается интегральными параметрами, включающими локальные

значения k и соответствующие элементарные площади (объемы) на которые зона загрязнения разделяется с помощью циклического алгоритма.

Для экспресс-прогноза целесообразно использовать регрессионные зависимости величины k от относительной величины ρ_k/ρ_{k0} при корреляционном отношении $R > 0,9$.

3. На одномерной и объемной физических моделях установлено, что при электрообработке зоны нефтезагрязнения водный раствор перемещается к аноду, а нефтепродукт - к катоду: при этом интенсивность электроосмотического процесса зависит от вязкости загрязнителя и увеличивается с введением в электроды-инъекторы растворителя типа Гексан-н. Термический эффект электрообработки заключается в коагуляции нефтепродукта в порах, увеличении размеров частиц и их слипанию. При этом нефтепродукт переходит в связное нерастворимое и менее токсичное состояние, влажность и плотность грунта уменьшаются, а в гранулометрическом составе резко снижается содержание фракции менее 0,1 мм и увеличивается содержание более крупных фракций.

При натурных испытаниях метода электрохимической обработки загрязненных грунтов на 9-электродной установке при увеличении напряжения до 300 В и плотности тока до 20 А/м² установлено существенное влияние вторичного увлажнения обрабатываемого грунта от прилегающих грунтов и атмосферы, что сужает диапазоны изменения физических свойств: влажность уменьшается на 3-6%, плотность – на 3-7%, содержание частиц фракции <0,1 мм в зависимости от вида загрязнителя уменьшается в 1,15-1,74 раза, а фракций 0,1 мм – увеличивается в 1,17-1,61 раза. Наиболее интенсивно процессы коагуляции нефтепродукта происходят в прианодной области, а скопление водно-нефтяной смеси – в прикатодной.

4. Определение расположения и размеров (диагностирование) зоны нефтезагрязнения методом георадиолокации обеспечивается по ослаблению горизонтальных линий синфазности на радарограммах и методом электрического зондирования по положительным аномалиям на графиках вертикального зондирования и профилирования. Результатом диагностирования с помощью системы продольных и поперечных профилей является объемная модель зоны загрязнения. Экспресс-контроль изменения коэффициента загрязнения k в процессе электрообработки грунта обеспечивается по величине эффективного УЭС

ρ_k при схеме позонного интегрального зондирования с использованием в качестве измерительных электродов-инъекторов. При опытных испытаниях после обработки в течение 168 ч величина k при загрязнении отработанным маслом снизилась с 7 до 2,11%, а при загрязнении бензином – до 3,49% (для экспоненциальной зависимости).

5. По возможности диагностирования зон загрязнения объекты различают на открытые, частично открытые и закрытые. Для объектов каждого типа по результатам радиолокационного или электрического зондирования строят модель зоны загрязнения, по величине интегрального показателя k принимают решение о выемке грунта (объекты открытого типа) или его электрохимической обработке (объекты частично открытого или закрытого типа).

Максимальное использование возможностей электросиловой установки обеспечивается увеличением напряжения обработки и увлажнением приэлектродных зон, при этом моменты регулировки режима или прекращения обработки определяют по стабилизации величины k .

Использование разработок позволяет повысить экологическую безопасность горных работ, а также снизить трудозатраты и расход электроэнергии за счет рационального режима электрообработки. Для объекта объемом 200 м³ экономия затрат на электроэнергию составит более 14,0 тыс. руб.

Список литературы

1. Из предварительного отчета о состоянии окружающей среды Кемеровской области за 2004 год // ЭКО-бюллетень ИПЭКА. - №3 (110). - 2005. - С. 12-13.
2. Хорошилова, Л. С. Геоэкологическое состояние угледобывающих регионов Кузбасса. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2007. – 135 с.
3. Ходжаева, Г. К. Нефтепромысловые трубопроводы: аварии, отказы и риски / Г. К. Ходжаева // Естественные и технические науки. – 2009. – №4 (42). – С. 495-501.
4. Пермяков, П. П. Идентификация параметров модели тепломассопереноса при техногенном загрязнении мерзлых грунтов / П. П. Пермяков // Вестник Томского государственного университета. – 2004. – №284. – С. 236-238.
5. Журавлева, Н. В. Комплексная оценка токсичности отходов горной промышленности с использованием химических, физико-химических и биологических методов / Н. В. Журавлева, З. Р. Исмаилов, О. В. Иwanyкина // ГИАБ. 2014. - №7. - С.352-361.
6. Журавлева, Н. В. Содержание токсичных элементов во вскрышных и вмещающих породах угольных месторождений Кемеровской области / Н. В. Журавлева, О. В. Иwanyкина, З. Р. Исмаилов, Р. Р. Потокина // ГИАБ. 2015. - №3. - С.187-196.
7. Воробейчик, В. Л. Воздействие точечных источников эмиссии поллютантов на наземные экосистемы: методология исследований, экспериментальные схемы, распространенные ошибки / В. Л. Воробейчик, М. В. Козлов. // Экология. – 2012. - №2. С. 83
8. Королев В. А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем / В. А. Королев // Учебное пособие: Москва. – КДУ. – 2007. – 416 с.
9. Очистка почв от нефтяного загрязнения и оценка ее эффективности / А. Н. Сухонослова, В. А. Бурлака, Д. Е. Быков [и др.] // Экология и промышленность России. – 2009. – № 10. – С. 18–20.
10. Archegova, I. B. Optimization of the purification of soil and water objects from oil using biosorbents / I. B. Archegova, F. M. Khabibullina, A. A. Shubakov // Contemporary Problems of Ecology. – 2012. – #6 – P.548–553.
11. Ахметзянова, Л. Г. Применение методов статистического анализа для определения безопасного содержания нефтепродуктов в серой почве / Л. Г. Ахметзянова, А. А. Савельев, С. Ю. Селивановская // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – С. 777–783.
12. Trusei, I. V. Distribution of microorganisms in the oil-polluted ground of vadose and saturation zones / I. V. Trusei, A. Yu. Ozerskii, V. P. Ladygina // Contemporary Problems of Ecology. – 2009. – #1. – P. 22–26.
13. Kolesnikov, S. I. Ecotoxicity assessment of heavy metals and crude oil based on biological characteristics of chernozem / S. I. Kolesnikov, M. G. Zharkova, K. Sh. Kazeev // Russian Journal of Ecology. – 2014. – #3. – P. 157–166.
14. Efremova, V. A. A chemical and biological assessment of the state of urban soils / V. A. Efremova, E. V. Dabakh, L. V. Kondakova // Contemporary Problems of Ecology. – 2013. – #5. – P. 561–568.
15. Korzhov, Yu. V. CLEANSOIL as a perspective method of remediation of oil-contaminated soils under existing infrastructure // Yu. V. Korzhov, E. D. Lapshina, D. I. Khoroshev // Contemporary Problems of Ecology. – 2010. – #3. – P. 292–298.

16. Королев, В. А. Методы очистки глинистых грунтов от нефтяных загрязнений / В. А. Королев, К. А. Ситар // Тр. межд. научн. конф. Сергиевские чтения. – М.: ГЕОС. – 2004. – Вып.6. – С.267-270.
17. Королев, В. А. Роль электроповерхностных явлений в механизмах вторичной миграции нефти / В. А. Королев, М. А. Некрасова, С. Л. Полищук // Геология нефти и газа. – 1997. – №6. – С. 28-32.
18. Распределение микроорганизмов в загрязненном нефтепродуктами грунте зон аэрации и насыщения / И. В. Трусей, А. Ю. Озерский, В. П. Лобыгин [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2009. – №1. – С. 29-35.
19. Ефремова, В. А. Химико-биологическая оценка состояния городских почв / В.А. Ефремова, Л.В. Кондакова, Е.В. Дабах // Сибирский экологический журнал. – 2013. – №5. – С. 741-750.
20. Коржов, Ю. В. Cleansoil – перспективный метод очистки нефтезагрязненных почв под существующей инфраструктурой // Ю.В. Коржов, Е.Д. Лапшина, Д.И. Хорошев и др. // Сибирский экологический журнал. – 2010. – №3. – С. 419-428.
21. Арчегова, И. Б. Оптимизация очистки почвы и водных объектов от нефти с помощью биосорбентов / И. Б. Арчегова, Ф. М. Хабибуллина, А. А. Шубаков // Сибирский экологический журнал. – 2012. – №2 – С.769-776
22. Середин, В. В. Исследование механизма агрегации частиц в глинистых грунтах при загрязнении их углеводородами / В. В. Середин, М. Р. Ядзинская // Фундаментальные исследования. – 2014. – №8-6. – С. 1408-1412.
23. Журавлев, А. П. Рекультивация нефтешламов и замазученных грунтов различной степени загрязнения без существенных капиталовложений, затрат и загрязнения окружающей среды / А. П. Журавлев, Р. И. Шаяхмедов // Экологический Вестник России. – 2016. – №2. – С. 21-23.
24. Кахраманов, Н. Т. Проблемы и решения, связанные с очисткой нефтезагрязненного грунта / Н. Т. Кахраманов, Р. Ш. Гаджиева, М. М. Агагусейнова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2012. – №3. – С. 55-59.
25. Очистка окружающей среды от углеводородных загрязнений / В. Ж. Аренс, А. З. Саушкин, О. М. Гридин [и др.]. – Москва: Изд-во «Интербук», 1999. – 371 с.
26. Патент на изобретение №2175040 C1(RU), МПК E02D3/11, E21C39/00. Способ электрохимического укрепления горных пород / С. М. Простов, В. А. Хмяляйнен, Ю. В. Бурков [и др.]. – №2000106128/03; Заявл. 13.03.2000; Оpubл. 20.10.2001.
27. Патент на изобретение № 2299294 C2(RU), МПК E02D3/11. Способ электрохимического укрепления горных пород / С. М. Простов, А. В. Покатилов, С. Л. Понасенко. – №2005126527/03; Заявл. 22.08.2005; Оpubл. 20.05.2007.
28. Патент на полезную модель № 94242 U1, E02D3/12. Электрод-инъектор / Д. И. Рудковский, С. М. Простов, О. В. Серова. – №2009147751/22; Заявл. 22.12.2009; Оpubл. 20.05.2010.
29. Патент на полезную модель № 9 7138 U1(RU), E02D3/11. Электрод-инъектор / Д. И. Рудковский, С. М. Простов. – №2010116458/03; Заявл. 26.04.2010; Оpubл. 27.08.2010.
30. Патент РФ на изобретение № 1809822 A3, МКИ C 02F 3/34. Способ очистки воды, почвы и поверхностей от загрязнений нефтью и нефтепродуктами / М. Б. Биттеева, И. Н. Щеблыкин, В. В. Бирюков [и др.]. – № 5026094/13; Заявл. 07.02.1992; Оpubл. 15.04.1993; Бюл. № 14.\

31. Патент РФ на изобретение № 2007372 (RU), МКИ Е 02В 15/04, С 02F 3/34. Способ очистки воды и почвы от загрязнений нефтью и нефтепродуктами / М. Б. Биттеева, И. Н. Щеблыкин, В. П. Изюмский [и др.]. – № 5037678/13; Заявл. 15.04.1992; Оpubл. 15.02.1994.

32. Патент РФ на изобретение № 2038333 С1 (RU), МКИ Е 02В 15/04, С 02F 3/34. Способ очистки воды и почвы от загрязнений нефтью и нефтепродуктами / М. Б. Биттеева, И. Н. Щеблыкин, В.В. Бирюков, Л. Н. Капотина. – № 92009212/13; Заявл. 04.12.1992; Оpubл. 27.06.1995.

33. Патент РФ на изобретение № 2019527 С1 (RU), МКИ Е 02В 15/04, С 02F 3/34, С 09К 17/00. Способ очистки почв от нефтяных загрязнений / Т. В. Коронелли, Э. И. Аракелян, Т. В. Герасимова [и др.]. – № 93017464/26; Заявл. 30.04.1993; Оpubл. 15.09.1994.

34. Патент РФ на изобретение № 2199406 С2 (RU), МКИ В 09С 1/10, С 12N 1/26, С 12R 1:07. Способ очистки почв от нефтяных загрязнений / И. М. Габбасова, Р. Р. Сулейманов, Р. Н. Ситдилов. – № 2001111427/13; Заявл. 25.04.2001; Оpubл. 27.02.2003.

35. А.с. № 2176164 С2 (RU), МКИ В 09С 1/10, В 09С 101:00, А 01В 79/02, С 09К 17/00. Способ биологической ремедиации нефтезагрязненных почв / Е. В. Чекакина, И. В. Егоров. – № 99114351/13; Заявл. 30.06.1999; Оpubл. 27.11.2001.

36. Ломизе, Г. М. Электроосмотическое водопонижение / Г. М. Ломизе, А. В. Нетушил. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1958. – 178 с.

37. Страданченко, С. Г. Исследование параметров химического и электрохимического закрепления грунтов / С. Г. Страданченко, П. Н. Должиков, А. А. Шубин. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2009. – 198 с.

38. Простов, С. М. Электрохимическое закрепление грунтов / С. М. Простов, А. В. Покатилов, Д. И. Рудковский ; РАЕН. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2011. – 294 с.

39. Korolev, V. A. Electrokinetic remediation of oil-contaminated soils / V. A. Korolev, O. V. Romanyukha, A. M. Abyzova // Journal of Environmental Science and Health. Part A: Toxic / Hazardous Substances and Environmental Engineering. – 2008. – Т. 43. № 8. – С. 876–880.

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

41. Злочевская, Р. И. Электроповерхностные явления в глинистых породах. – Москва: Из-во МГУ, 1988. – 177 с.

42. Королев, В. А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. – Москва: ООО «Сам полиграфист», 2015. – 468 с.

43. Хямяляйнен, В. А. Электрическое поле при фильтрации инъекционного раствора / В. А. Хямяляйнен, С. М. Простов. // ФТПРПИ. – 1995. - №4. – С. 52-56.

44. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна / Г. Г. Штумпф, Ю. А. Рыжков, В. А. Шаламанов, А. И. Петров. – М.: Недра. – 1994. – 447 с.

45. Шабанов, Е.А. К вопросу очистки грунтов от экотоксикантов электрохимическим методом / Е.А. Шабанов, С.М. Простов, М.В. Гуцал // Природные ресурсы Сибири и дальнего востока - взгляд в будущее: материалы международного экологического форума. – Кемерово. – 2013. – С. 170–176.

46. Шевцова, Р.Г. Влияние нефтяных загрязнений на окружающую среду / Р. Г. Шевцова, О. Ю. Резниченко // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые

химико-технологические процессы защиты окружающей среды сборник докладов международной научно-технической конференции / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2015. – С. 450-454.

47. 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.

48. Шувалов, Ю. В. Очистка грунтов от загрязнения нефтью и нефтепродуктами / Ю. В. Шувалов, Е. А. Синькова, Д. Н. Кузьмин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – №12. – С. 7.

49. Каченов, В. И. К вопросу о влиянии нефтяных загрязнений на свойства грунтов / В.И. Каченов, В.В. Середин, С.В. Карманов // Геология и полезные ископаемые западного Урала / Пермский государственный национальный исследовательский университет. – 2011. – №11. – С. 164-165.

50. Проблемы очистки геологической среды от загрязнений / В.А. Королев, М.А. Некрасова, С.Л. Полищук, Д.В. Доброва // Тр. ежегодн. научн. конференции «Ломоносовские чтения». – М., МГУ. – 1997. – С.130-131.

51. МУК 4.1.1956-05. Определение концентрации нефти в почве методом инфракрасной спектрофотометрии. Методические указания. – ГУ НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина. – 2005. – 8 с.

52. Проскуряков, В. А. Нефтехимия / В. А. Проскуряков, А. Е. Драбкин // из-во Санкт-Петербург. – 1995 – с.

53. Саксонов, М. Н. Экологический мониторинг нефтегазовой отрасли. Физико-химические и биологические методы / М. Н. Саксонов, А. Д. Абалаков, Л. В. Данько // Иркутск: Иркутский ун-т. – 2005. – 114 с.

54. Берне, Ф. Водоочистка / Ф. Берне, Ж. Кордонье // М.: Химия. – 1997. – 288 с

55. Vorobeichik, E. L. Impact of point polluters on terrestrial ecosystems: Methodology of research, experimental design, and typical errors / E. L. Vorobeichik, M. V. Kozlov // Russian Journal of Ecology. – 2012. – #2. P. 89–96.

56. Seredina, V. P. The soils of West Siberia middle taiga oil deposits and a predictive estimate of contamination hazard with organic pollutants / V. P. Seredina, M. E. Sadykov // Contemporary Problems of Ecology. – 2011. – #5 – P. 457.

57. Простов, С. М. Электромагнитный геоконтроль процессов укрепления грунтов / С.М. Простов, О.В. Герасимов, Е.А. Мальцев. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2007 – 211 с.

58. Простов, С. М. Комплексный геолого-геофизический мониторинг процессов упрочнения грунтов / С.М. Простов, О.В. Герасимов, Н.Ю. Никулин. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2015. – 344 с.

59. Жданов, М. С. Электроразведка. – М: Недра. – 1986. – 316 с.

60. Изюмов, С. В. Теория и методы георадиолокации / С.В. Изюмов, С.В. Дружинин, А.С. Вознесенский. – Москва: Горная книга, - МГТУ, 2008. – 196 с.

61. Геоэлектрический контроль зон укрепления глинистых горных пород / С.М. Простов, В.А. Хямяляйнен, М.В. Гуцал, С.П. Бахаева. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2005. – 127 с.

62. Вартанов, А. З. Физико-технический контроль и мониторинг при освоении подземного пространства городов / А. З. Вартанов // М.: из-во «Горная книга». – 2013. – 548 с.

63. Простов, С.М. Взаимосвязи электрофизических свойств глинистых горных пород с пористостью и влагонасыщенностью / С. М. Простов, В. А. Хямяляйнен, С. М. Бахаева // ФТПРПИ. – 2006. – №4 – С.47-58
64. Турчанинов, И. А. Инженерные геофизические методы определения и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород / И. А. Турчанинов, В. И. Панин // Л.: Наука. Ленингр. отд-ние. – 1975. – 320 с.
65. Штенберг, С. С. Геофизические исследования в скважинах / С. С. Штенберг, Г. Д. Дахгильков. – М.: Недра. – 1982. – 245 с.
66. Тютюнник, П. М. Геоакустический контроль состояния пород и качества предварительного тампонажа массива при сооружении шахтных стволов / П. М. Тютюнник, В. В. Смирнов, В. П. Сбитнев // Шахтное строительство. – 1984. – №2. – С.20-23
67. Ямщиков, В. С. Акустическая установка «Цемент-МГИ» для контроля качества предварительного тампонажа пород / В. С. Ямщиков, П. М. Тютюнник, В. В. Смирнов // Шахтное строительство. – 1984. – №8. – С.10-13
68. Смирнов, В. В. Акустический контроль качества тампонажа горных пород при сооружении ствола шахты / В. В. Смирнов, Н. Н. Андреева, П. М. Тютюнник // Шахтное строительство. – 1986. – №8. – С.4-6
69. Тютюнник, П. М. Геоакустический многопараметровый контроль ледогрунтового ограждения при подземном строительстве способом замораживания / П. М. Тютюнник, В. С. Ямщиков, В. И. Ресин // Шахтное строительство. – 1981. – №11. – С.9-14
70. Бауков, Ю. Н. О возможности применения геофизической модификации велосимметрического метода при контроле затюбингового пространства и отделки тоннелей / Изв. Вузов. Горный журнал. – М. – 1991. – №9. – С.13-19
71. Шадрин, А. В. Акустоэмиссионный мониторинг профилактической гидрообработки угольных пластов // Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых. – 2000. – №5. – С.98-102
72. Выбрособезопасность на гидрошахтах Кузбасса / П. В. Егоров, В. А. Рудаков, А. В. Шадрин, В. А. Ковалев и др. – Кемерово: Кузбассвуиздат. – 2000. – 153 с.
73. Анцыферов, М. С. Сейсмоакустические исследования в угольных шахтах / М. С. Анцыферов, А. Т. Константинова, Л. В. Переверзев // М.:Изд-во АН СССР. – 1960. – 103 с.
74. Новые возможности звукометрического метода наблюдения проявлений горного давления / И. Д. Ривкин, Л. А. Богданов, В. В. Цариковский и др. // Горный журнал. – 1977. – №10. – С.62-66
75. Контроль эффективности смолоинъекционного упрочнения трещиноватых скальных пород ультразвуковым методом / В. М. Безденежных, Е. В. Кузьмич, С. И. Пацев, С. В. Фомичева // Изв. вузов. Горный журнал. – 1984. – №7. – С.7-10
76. Муратов, В. А. Исследование состояния массива горных пород вокруг выработок ультразвуком / В. А. Муратов, Б. Г. Костельцев, В. Н. Маньков // Шахтное строительство. – 1971. – №11. – С.11-14.
77. Онищенко, А. М. Контроль процессов горного производства инфракрасными методами / А. М. Онищенко, И. Б. Кричко, А. В. Ивашов // Изв. вузов. Горный Журнал. – 1991. – №8. – С.1-4
78. Дахнов, В. Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин / В. Н. Дахнов. – М.: Недра. – 1981. – 344 с.
79. Матвеев, Б. К. Электроразведка / Б. К. Матвеев // М.: Недра. – 1990. – 368 с
80. Жданов, М. С. Электроразведка / М. С. Жданов // М.: Недра. – 1986. – 316 с.

81. Подземная геофизика // М.: Недра. – 1973. – 430 с.
82. Молев, М. Д. Прогнозирование горно-геологических условий подземной разработки угля на основе комплексных геофизических исследований: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М. Д. Молев. – М. – 2001. – 42 с.
83. Хямяляйнен, В. А. Геоэлектрический контроль разрушения и инъекционного упрочнения горных пород / В. А. Хямяляйнен, С. М. Простов, П. С. Сыркин // М.: Недра. – 1996. – 288 с.
84. Петухов, И. М. О исследовании изменение электропроводности горных пород для изучения напряженного состояния их в массиве и коллекторных свойств / И. М. Петухов, Л. М. Мarmorштейн, Г. Д. Морозов // Труды ВНИМИ. – 1961. – сб. 42. – С.110-118.
85. Простов, С. М. Обоснование и разработка способов геоэлектрического контроля параметров трещиноватости и цементации пород вокруг выработок: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С. М. Простов. – Кемерово. – 1996. – 40 с.
86. Кашкаров, А. А. Геоэлектрический контроль геомеханических явлений / А. А. Кашкаров, А. А. Панжин, В. В. Мельник // <http://igd/geomech/>.
87. Кашкаров, А. А. Геоэлектрическое моделирование геомеханических процессов на подрабатываемых территориях / А. А. Кашкаров, С. В. Усанов // <http://igd/geomech/>.
88. Простов, С. М. Определение геометрических параметров неустойчивых зон методами электроразведки / С. М. Простов, М. В. Гуцал, В. Х. Шаймуратов /// Изв. вузов. Горный журнал. – 2000. – №5. – С.12-15
89. Геофизика / Под ред. В. К. Хмелевского. – 2-е изд. – М.: КДУ. – 2009. – 320 с.
90. Электрофизические свойства влагонасыщенных грунтов при индукционном геоконтроле / С. М. Простов, М. В. Гуцал, Е. А. Мальцев, В. В. Демьянов // Вестник КузГТУ. – 2002. – №6. – С.12-15
91. Простов, С. М. Электросопротивление влагонасыщенных грунтов и пород при инъекционном укреплении / С. М. Простов, М. В. Гуцал, Р. Ф. Гордиенко // Вестник КузГТУ. – 2002. – №6. – С.12-18.
92. Простов, С. М. Геоэлектрический контроль при укреплении неустойчивых обводненных породных массивов / С. М. Простов, М. В. Гуцал // Вестник КузГТУ. – 2000. – №5. – С. 96-98
93. Простов, С. М. Определение параметров углевмещающих осадочных пород электрофизическим методом / С. М. Простов, А. С. Костромин // Вестн. РАЕН (Зап.-Сиб. Отд.). – 2001. – Вып. 4. – С. 25-26
94. Вознесенский, А. С. Георадиолокационное обнаружение полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов / А. С. Вознесенский, В. В. Набатов // М.: Горный журнал. – 2015. – №2. – С. 15-20.
95. Вознесенский, А. С. Георадиолокационная оценка качества контакта "грунт-обделка" в условиях тоннелей метрополитенов / А. С. Вознесенский, В. В. Набатов, Р. М. Гайсин // ГИАБ (Научно-технический журнал). – 2013. – №9. – С.157-163
96. Вознесенский, А. С. Принципы построения и перспективы развития устройств контроля массива горных пород и крепления вокруг выработок / А. С. Вознесенский, Е. А. Вознесенский, В. В. Корякин, М. Н. Красилов // ГИАБ (Научно-технический журнал). – 2015. – №1. – С.199-206

97. Хмелинин, А. П. Диагностика состояния бетонной обделки горных выработок на наличие в ней неоднородностей с помощью георадиолокационного метода / А. П. Хмелинин, В. Д. Барышников, Е. В. Денисова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – №1. – С. 30-38

98. Хмелинин, А. П. Исследование модели механического контакта «бетонная крепь-массив вмещающих пород» методом георадиолокации / А. П. Хмелинин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. – №2. – С. 358-361

99. Хмелинин, А. П. Исследование влияния физико-механических свойств геосреды на точность геофизических методов при локации подземных объектов / А. П. Хмелинин, Е. В. Денисова // ГИАБ (Научно-технический журнал). – 2012. – №10. – С.107-109

100. Кобранова, В. Н. Физические свойства горных пород. – Москва: Гос. науч.-техн. изд-во нефтяной и горно-топливной лит., 1962. – 490 с.

101. Prostov, S. M., Khyamyalyainen V. A., Bakhaeva S. P. Interrelation among electrophysical properties of clay rocks, their porosity and moisture saturation // Journal of Mining Science. – 2006. – #4 – P.349–359.

102. Ржевский, В. В. Основы физики горных пород: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – Москва: Недра, 1984. – 359 с.

103. Простов, С. М. Метод оценки загрязнения нефтепродуктами по электрическим свойствам грунтов / С. М. Простов, М. В. Гуцал, Е. А. Шабанов // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 6. – С 38–44.

104. Physical basis of controlled electrochemical cleaning soils from petroleum / Sergey M. Prostov, Maxim V. Gucal, Evgeniy A. Shabanov// Proceedings of the Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control / Atlantis Press. – 2014. – p. 433–441.

105. Середина, В. П. Почвы нефтяных месторождений средней тайги Западной Сибири и прогнозная оценка опасности загрязнения органическими поллютантами / В. П. Середина, М. Е. Садыков // Сибирский экологический журнал. – 2011. – №5 – С.617-623.

106. Шабанов, Е.А. Исследование физических свойств грунтов при электроосмотической обработке / Е.А. Шабанов, С.М. Простов, М.В. Гуцал // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – №1(107). – С. 3–7.

107. Шабанов, Е.А. Экспериментальное исследование физических свойств грунтов при электроосмотической очистке от нефтепродуктов / Е.А. Шабанов, С.М. Простов // Горняцкая смена - 2015: Сборник трудов Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы. – Новосибирск. – 2015. – С. 155 – 162.

108. Evgeniy Shabanov, Sergey Prostov. Electrophysical Monitoring of the Processes of Electroosmotic Treatment of Soil from Oil Pollution on Laboratory Installations. Proceedings of the 8th Russian-Chinese Symposium “Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety”. Advances in Engineering Research. September (2016). Volume 92. pp. 175-183

109. Шабанов Е. А. Исследование процессов электроосмотической очистки грунтов от нефтезагрязнений на объемной физической модели / Е. А. Шабанов // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: СибГИУ. – Новокузнецк. – 2016. – №2. – С. 434-440.

110. Шабанов, Е. А. Электрофизический мониторинг процессов электроосмотической очистки грунтов от нефтезагрязнений на лабораторных

установках / Е.А. Шабанов, С.М. Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – №1(119). – С. 3-14.

111. Шабанов, Е. А. Исследование процессов электрохимической очистки грунтов от нефтезагрязнений с использованием активного реагента / Е.А. Шабанов, С.М. Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – №2(120). – С. 20-27.

112. Шабанов, Е. А. Натурные испытания метода контролируемой электрохимической очистки грунта от нефтезагрязнений. Ч.І. Изменение физических свойств грунтового массива / Е.А. Шабанов, С.М. Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – №6 (118). – С. 35–43.

113. Шабанов, Е. А. Натурные испытания метода контролируемой электрохимической очистки грунта от нефтезагрязнений. Ч.ІІ. Электрофизический контроль / Е.А. Шабанов, С.М. Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – №6 (118). – С. 44–50.

114. Шабанов, Е. А. Натурные испытания метода контролируемой электрохимической очистки грунта от нефтезагрязнений. Ч.ІІІ. Электрофизический мониторинг зоны загрязнения / Е.А. Шабанов, С.М. Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – №3(121). – С. 80-86.

115. Шабанов, Е. А. Перспектива применения технологии электрохимической очистки загрязненных грунтов в Кузбассе / Е.А. Шабанов, С.М. Простов, М.В. Гуцал // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: материалы X международной научно-практической конференции. – 2013. – Кемерово. – С. 390–393.

116. Шабанов, Е. А. Физическое моделирование процессов электроосмотической обработки грунтов на одномерной модели/ Е.А. Шабанов, С.М. Простов, М.В. Гуцал // Эколог - профессия будущего: материалы Молодежного научного семинара. – 2014. – Кемерово. – С. 40 – 45.

117. Свидетельство №2015614431 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета интегрального показателя загрязнения грунта экотоксикантом» / Е.А. Шабанов, С. М. Простов, М. В. Гуцал; заявл. 2.03.2015; №2015611237; зарегистр. 17.04.2015.

118. Свидетельство №2015614447 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета концентрации нефтепродукта в составе раствора, заполняющего поровое пространство грунта» / Е.А. Шабанов, С. М. Простов, М. В. Гуцал; заявл. 2.03.2015; №2015611182; зарегистр. 17.04.2015.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программа для расчета концентрации нефтепродукта в составе раствора,
заполняющего поровое пространство грунта

```

unit Unit1;
{$mode objfpc}{$H+}
interface
uses
  Classes, SysUtils, FileUtil, Forms, Controls,
  Graphics, Dialogs, StdCtrls,
  ExtCtrls, ActnList, Math;
type
  { TForm1 }
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    Button2: TButton;
    Label1: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    Label13: TLabel;
    Label14: TLabel;
    Label15: TLabel;
    Label16: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    LabeledEdit1: TLabeledEdit;
    LabeledEdit12: TLabeledEdit;
    LabeledEdit13: TLabeledEdit;
    LabeledEdit14: TLabeledEdit;
    LabeledEdit2: TLabeledEdit;
    LabeledEdit3: TLabeledEdit;
    LabeledEdit4: TLabeledEdit;
    LabeledEdit5: TLabeledEdit;
    LabeledEdit6: TLabeledEdit;
    LabeledEdit7: TLabeledEdit;
    LabeledEdit8: TLabeledEdit;
    LabeledEdit9: TLabeledEdit;
    LabeledEdit10: TLabeledEdit;
    LabeledEdit11: TLabeledEdit;
  procedure FormCreate(Sender: TObject);
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
  procedure Button2Click(Sender: TObject);
  procedure Label1Click(Sender: TObject);
  procedure LabeledEdit1Change(Sender:
    TObject);
  private
    { private declarations }
  public
    { public declarations }
  end;
  var
    Form1: TForm1;
  n: integer;
    h1, h2: real;
  implementation
    {$R *.lfm}
    { TForm1 }
  Procedure TForm1.FormCreate(Sender:
    TObject);
  begin
  end;
  //Создание матриц для определения опти-
  мальных структурных параметров
  procedure TForm1.Button2Click(Sender:
    TObject);
  var a, kp, m, W, b, y, rk0, rvp, rkr, min: real;
  r: array of array of real;
    b1: array of array of real;
    y1: array of array of real;
  i, j: integer;
  begin
    a:= StrToFloat(LabeledEdit1.text);
    kp:= StrToFloat(LabeledEdit6.text);
    m:= StrToFloat(LabeledEdit4.text);
    W:= StrToFloat(LabeledEdit5.text);
    rk0:= StrToFloat(LabeledEdit10.text);
    rvp:= StrToFloat(LabeledEdit11.text);
    n:= StrToInt(LabeledEdit12.text);
    SetLength(r, n, n);
    SetLength(b1, n, n);
    SetLength(y1, n, n);
    b:=1.3;
    y:=1.8;
    h1:=0.9/n;
    h2:=1.7/n;
    for i:=1 to n-1 do
      begin

```

```

for j:=1 to n-1 do
begin
rkr:=((a*kp)/((exp(ln(m)*b))*(exp(ln(W)*y)))
)*rvp;
r[i,j]:=abs(rkr-rk0);
b1[i,j]:=b;
y1[i,j]:=y;
y:=y+h2;
end;
y:=1.8;
b:=b+h1;
end;
min:=r[1,1];
for i:=1 to n-1 do
begin
for j:=1 to n-1 do
begin
if r[i,j]<=min then
begin
min:=r[i,j];
b:=b1[i,j];
y:=y1[i,j];
end;
end;
end;
LabeledEdit2.text :=FloatToStr(b);
LabeledEdit3.text :=FloatToStr(y);
end;
//Определение доли нефтепродукта
procedure TForm1.Button1Click(Sender:
TObject);
vara,kp,m,W,b,y,rk,Vn,re,rn: real;

```

```

begin
a:= StrToFloat(LabeledEdit1.text);
b:= StrToFloat(LabeledEdit2.text);
kp:= StrToFloat(LabeledEdit6.text);
y:= StrToFloat(LabeledEdit3.text);
m:= StrToFloat(LabeledEdit4.text);
W:=StrToFloat(LabeledEdit5.text);
rk:= StrToFloat(LabeledEdit7.text);
re:= StrToFloat(LabeledEdit9.text);
rn:= StrToFloat(LabeledEdit13.text);
Vn:=abs(ln((rk*(exp(ln(m)*b))*(exp(ln(W)*y
)))/(a*kp*re)))/(ln(rn/re))*100;
LabeledEdit8.text :=FloatToStr(Vn);
end;
procedure TForm1.Label1Click(Sender:
TObject);
begin
end;
procedure
TForm1.LabeledEdit1Change(Sender:
TObject);
begin
end;
end.

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программа для расчета интегрального показателя
загрязнения грунта экотоксикантом

```

unitUnit1;
{$modeobjfpc}{$H+}
interface
uses
  Classes, SysUtils, FileUtil, Forms, Controls,
  Graphics, Dialogs, ComCtrls,
  StdCtrls, Grids;
type
{ TForm1 }
TForm1 = class(TForm)
  Button1: TButton;
  Button2: TButton;
  Button3: TButton;
  Edit1: TEdit;
  Edit10: TEdit;
  Edit11: TEdit;
  Edit12: TEdit;
  Edit13: TEdit;
  Edit14: TEdit;
  Edit16: TEdit;
  Edit17: TEdit;
  Edit15: TEdit;
  Edit18: TEdit;
  Edit2: TEdit;
  Edit3: TEdit;
  Edit4: TEdit;
  Edit5: TEdit;
  Edit6: TEdit;
  Edit7: TEdit;
  Edit8: TEdit;
  Edit9: TEdit;
  Label11: TLabel;
  Label10: TLabel;
  Label11: TLabel;
  Label12: TLabel;
  Label13: TLabel;
  Label14: TLabel;
  Label15: TLabel;
  Label16: TLabel;
  Label17: TLabel;
  Label18: TLabel;
  Label19: TLabel;
  Label2: TLabel;
  Label20: TLabel;
  Label21: TLabel;
  Label22: TLabel;
  Label23: TLabel;
  Label24: TLabel;
  Label25: TLabel;
  Label3: TLabel;
  Label4: TLabel;
  Label5: TLabel;
  Label6: TLabel;
  Label7: TLabel;
  Label8: TLabel;
  Label9: TLabel;
  PageControl1: TPageControl;
  StringGrid1: TStringGrid;
  StringGrid2: TStringGrid;
  StringGrid3: TStringGrid;
  TabSheet1: TTabSheet;
  TabSheet2: TTabSheet;
  TabSheet3: TTabSheet;
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
  procedure Button2Click(Sender: TObject);
  procedure Button3Click(Sender: TObject);
  procedure PageControl1Change(Sender:
    TObject);
  procedure StringGrid2ButtonClick(Sender:
    TObject; aCol, aRow: Integer);
  procedure TabSheet2Show(Sender: TObject);
  procedure TabSheet3Show(Sender: TObject);
private
  { private declarations }
public
  { public declarations }
end;
var
  Form1: TForm1;
  a,kp,m,W,b,y,rk0,rvp,rkr,min,rk,Vn,re,mn:
  real;
  r:array of array of real;
  b1:array of array of real;
  y1:array of array of real;
  i,j,x,z: integer;
  n,hl,p,p1,h,g,t,q:integer;
  h1,h2,L,s,hz,se,rkrit,sz,sv: real;
  Ip,Iz,Iv:real;
implementation
{$R *.lfm}

```

```

{ TForm1 }
//Создание матрицы для ввода УЭС
procedure TForm1.TabSheet2Show(Sender:
TObject);
begin
h:= StrToInt(Edit9.text);
hl:= StrToInt(Edit10.text);
stringgrid1.colcount:=h+1;
stringgrid1.rowcount:=hl+1;
StringGrid1.Options:=[goFixedVertLine,
goFixedHorzLine, goVertLine, goHorzLine,
goRangeSelect, goEditing, goSmoothScroll];
for i:=1 to h do
stringgrid1.cells[i,0]:=IntToStr(i);
for i:=1 to hl do
stringgrid1.cells[0,i]:=IntToStr(i);
end;

procedure
TForm1.PageControl1Change(Sender:
TObject);
begin
end;
procedure
TForm1.StringGrid2ButtonClick(Sender:
TObject; aCol, aRow: Integer);
begin
end;
//Основной расчет. Вывод результатов в
матрицу показателя загрязнения по профи-
лю
procedure TForm1.Button1Click(Sender:
TObject);
begin
a:= StrToFloat(Edit1.text);
kp:= StrToFloat(Edit3.text);
m:= StrToFloat(Edit4.text);
W:=StrToFloat(Edit2.text);
rk0:= StrToFloat(Edit6.text);
rvp:= StrToFloat(Edit7.text);
n:= StrToInt(Edit11.text);
re:= StrToFloat(Edit5.text);
rn:= StrToFloat(Edit8.text);
L:=StrToFloat(Edit12.text);
hz:= StrToFloat(Edit13.text);
rkrit:= StrToFloat(Edit14.text);
p:= StrToInt(Edit16.text);
SetLength(r,n,n);
SetLength(b1,n,n);
SetLength(y1,n,n);

```

```

b:=1.3;
y:=1.8;
h1:=0.9/n;
h2:=1.7/n;
s:=L*hz;
se:=s/(h*hl);
sz:=0;
sv:=0;
Iv:=0;
p1:= StrToInt(Edit18.text);
if p1<=p then
begin
for x:=1 to h do
begin
for z:=1 to hl do
begin
for i:=1 to n-1 do
begin
for j:=1 to n-1 do
begin
rkr:=((a*kp)/((exp(ln(m)*b))*(exp(ln(W)*y)))
)*rvp;
r[i,j]:=abs(rkr-rk0);
b1[i,j]:=b;
y1[i,j]:=y;
y:=y+h2;
end;
y:=1.8;
b:=b+h1;
end;
min:=r[1,1];
for i:=1 to n-1 do
begin
for j:=1 to n-1 do
begin
if r[i,j]<=min then
begin
min:=r[i,j];
b:=b1[i,j];
y:=y1[i,j];
end;
end;
end;
rk:= StrToFloat(StringGrid1.Cells[x,z]);

Vn:=abs(ln((rk*(exp(ln(m)*b))*(exp(ln(W)*y
)))/(a*kp*re)))/(ln(rn/re))*100;
StringGrid2.Cells[x,z]:= FloatToStr(Vn);
ifrk>=rkrit then
begin

```

```

sz:=sz+se;
sv:=sv+(Vn*se);
end;
end;
end;
Ip:=sv/sz;
Edit15.text:= FloatToStr(Ip);
StringGrid3.Cells[p1,1]:= FloatToStr(Ip);
end;
end;
//Создание матриц для вывода результатов
расчета
procedure TForm1.TabSheet3Show(Sender:
TObject);
begin
g:= h;
t:= hl;
p1:= StrToInt(Edit18.text);
p:= StrToInt(Edit16.text);
stringgrid2.colcount:=g+1;
stringgrid2.rowcount:=t+1;
StringGrid2.Options:=[goFixedVertLine,
goFixedHorzLine, goVertLine, goHorzLine,
goRangeSelect, goEditing, goSmoothScroll];
for i:=1 to g do
stringgrid2.cells[i,0]:=IntToStr(i);
for i:=1 to t do
stringgrid2.cells[0,i]:=IntToStr(i);
stringgrid3.colcount:=p+1;
StringGrid3.Options:=[goFixedVertLine,
goFixedHorzLine, goVertLine, goHorzLine,
goRangeSelect, goEditing, goSmoothScroll];
for i:=1 to p do
stringgrid3.cells[i,0]:=IntToStr(i);
for i:=1 to 1 do
stringgrid3.cells[0,1]:=IntToStr(i);
end;
end;

```

```

//Обнуление матриц ввода-вывода данных
procedure TForm1.Button2Click(Sender:
TObject);
begin
with StringGrid1 do
for i:=FixedCols to ColCount-1 do
for j:=FixedRows to RowCount-1 do
Cells[i, j]:="";
with StringGrid2 do
for i:=FixedCols to ColCount-1 do
for j:=FixedRows to RowCount-1 do
Cells[i, j]:="";

```

```

end;
//Расчет и вывод показателя загрязнения по
зоне
procedure TForm1.Button3Click(Sender:
TObject);
begin
for x:=1 to p do
begin
Ip:=StrToFloat(StringGrid3.Cells[x,1]);
Iv:=Iv+Ip;
end;
Iz:=Iv/p;
Edit17.text:= FloatToStr(Iz);
end;
end.

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Общество с ограниченной ответственностью
«НООЦЕНТР»

Согласовано:
 Зам. директора по научной работе
 НИИОСП им. Н. М. Герсевича
 _____ О. А. Шулятьев
 «27» _____ 2017 г.

Утверждаю:
 Проректор по научной работе КузГТУ
 _____ С. Г. Костюк
 «28» _____ 2017 г.

Утверждаю:
 Генеральный директор
 ООО «НООЦЕНТР»
 _____ О. В. Герасимов
 «28» _____ 2017 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по геолого-геофизическому мониторингу процессов
электрохимической очистки грунтовых оснований сооружений
от загрязнений нефтепродуктами

Кемерово 2017