Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное федеральное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Т.Ф. ГОРБАЧЕВА» (КузГТУ)

УДК 35.512, 622.257.1
Госрегистрация № 114092340062
Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научно-
инновационной работе, д.т.н.
_____ В.П. Тациенко
«__» _____ 2015г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

по годовому этапу научно-исследовательской работы No 598 в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по Заданию No2014/76 за 2014 год

по теме:

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОГНОЗА И ЛИКВИДАЦИИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ КАТАСТРОФ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТАНОУГОЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА

(Промежуточный)

Руководитель работы, директор научно-
образовательного геотехнического
инновационного центра,
к.т.н., доц.

23.01.15 М.В. Гуцал
подпись, дата

Кемерово 2015

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы
к.т.н., доц. 23.01.15 М.В. Гуцал
подпись, дата

Исполнители темы:

к.т.н., доц. 23.01.2015 Д.Ю. Сирота
подпись, дата

Аспиранты:

23.01.2015 К.Л. Дудко
подпись, дата

23.01.2015 М.А. Баев
подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет 140 с., 1 ч., 59 рис., 17 табл., 46 источн.

ТЕХНОГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ПРОГНОЗ, ЛИКВИДАЦИЯ, КАТАСТРОФА, УГОЛЬНЫЕ МАССИВЫ, ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ГРУНТОВЫЙ МАССИВ, УСТОЙЧИВОСТЬ, ЗАГРЯЗНЕНИЕ, ТЕХНОГЕННАЯ АВАРИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ, ЭКОСИСТЕМА, УДАРООПАСНОСТЬ, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, МЕТАН, СКВАЖИНА, ТАМПОНАЖ, ГИДРОРАЗРЫВ, ПРОПАНТ, РЕОЛОГИЯ, ЗОЛА.

Объектом исследования являются сейсмически активные месторождения полезных ископаемых, неустойчивые грунты, основания зданий горнотехнических сооружений.

Цель работы - создание технологии прогноза, предупреждения и ликвидации естественных и техногенных катастроф и снижения их влияния на промышленную безопасность при разработке полезных ископаемых в сейсмоопасных условиях Кузбасса.

Решаемые задачи – разработка методов прогноза техногенных землетрясений на основе геодезических измерений, измерений естественного электрического поля земли в горных породах, на земной поверхности и в атмосфере (на базе научного открытия №58); исследование закономерностей изменения физико-химических и электрических свойств загрязненных грунтов при электроосмотической обработке; разработка методики и схемы электроосмотической обработки неустойчивых и загрязненных грунтовых массивов; экспериментальные исследования, в том числе: исследование свойств тампонажных растворов; исследование свойств тампонажных камней; исследование проницаемости естественных трещин и трещин гидроразрыва; обработка и интерпретация результатов экспериментальных исследований, экспериментальные исследования по установлению критических значений УЭС образцов горных пород в предразрушающем состоянии.

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ 6
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ 13
ВВЕДЕНИЕ 14
1 Разработка метода краткосрочного прогноза техногенных и естественных землетрясений на основе регистрации аномалий естественного электрического поля земли и возмущений атмосферно – электрического поля при активизации сейсмического режима 16
1.1 Анализ космоструктурных снимков земной коры юга Кузбасса 16
1.1.1. Общая сейсмическая обстановка в Кузбассе за последние десятилетия 16
1.1.2 Анализ материалов космоструктурного дешифрирования 20
1.2 Разработка методики оценки сейсмоопасности и прогноза геодинамических процессов на участках метаноугольных месторождений 24
1.2.1 Сейсмическая обстановка на территории Кемеровской области 24
1.2.2 Сейсмическая активизация в окрестности г. Осинники 25
1.2.3 Выявление блоковых структур месторождения угля по добыче метана из скважин 26
1.3 Разработка прогнозных карт сейсмоопасности участков метаноугольных месторождений Кузбасса 47
2. Определение параметров зон дезинтеграции (разрушения) горных пород на основе данных геоэлектрических измерений на шахтных полях 51
2.1 Разработка теоретической модели, которая связывает пространственно-геометрические характеристики области дезинтеграции горных пород с параметрами электрических полей естественной природы 51
2.1.1. Гипотезы формирования очаговой зоны области дезинтеграции горных пород 51
2.1.2. Потенциал равномерно заряженного эллипсоида в трёх – и четырёхслойном однородном изотропном пространстве 54
2.1.3. Оценка основных геометрических параметров очаговой зоны 62
2.2 Разработка теоретической модели, связывающей величину перепадов механических напряжений и характеристик порождённых электрических полей 64
3 Свойства тампонажных растворов на основе ЗШО и тампонажных камней. 78
3.1 Функции, выполняемые тампонажными растворами и предъявляемые к ним требования 78
3.2 Материалы для приготовления тампонажных растворов 80
3.3 Тампонажные портландцементы 82
4 Программа и методика проведения экспериментальных исследований свойств тампонажных растворов на основе ЗШО 85

4.1 Программа исследовательских испытаний 85
4.2 Определение водоотделения тампонажного раствора 86
4.2.1 Методика экспериментальных исследований 86
4.2.2 Результаты исследований 88
4.3 Определение плотности тампонажного раствора 88
4.3.1 Методика экспериментальных исследований 88
4.3.2 Результаты исследований 90
4.4 Определение эффективной вязкости тампонажного раствора 90
4.4.1 Методика экспериментальных исследований 90
4.4.2 Результаты исследований 92
4.5 Определение выхода тампонажного камня 96
4.5.1 Методика экспериментальных исследований 96
4.5.2 Результаты исследований 97
4.6 Определение прочности тампонажного камня на сжатие 97
4.6.1 Методика экспериментальных исследований 97
4.6.2 Результаты исследований 100
5 Исследование закономерностей изменения удельного электрического сопротивления образцов горных пород от степени их нагружения 101
5.1 Лабораторная установка и проведение измерений по определению УЭС образцов горных пород таштагольского месторождения в предразрушающем состоянии 102
5.2 Статистическая обработка результатов полученных измерений 103
5.3 Функциональные зависимости изменения УЭС пород от механического напряжения 105
6 Исследование закономерностей изменения физико-химических и электрических свойств загрязненных грунтов при электроосмотической обработке 110
6.1 Анализ основных источников загрязнения грунтов в Кузбассе 110
6.2 Физические основы контролируемой электрохимической очистки грунтов от нефтепродуктов 114
6.3 Способ оценки содержания нефтепродуктов в грунте 121
6.4 Влияние неоднородности при моделировании процесса электрохимической очистки грунтов 122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 132
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 136

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Амплитуда колебаний – максимальное значение смещения или изменения переменной величины от среднего значения при колебательном или волновом движении.

Геодинамическое районирование горного массива – определение его блочного строения и напряженного состояния. Геодинамическое районирование включает выделение блочной структуры месторождения, установление динамического взаимодействия блоков, выделении тектонически напряженных зон, оценку направления и величину главных напряжений в блоках, а также разработку профилактических мер для безопасной и эффективной разработки месторождения.

Геологический разлом – нарушение сплошности горных пород, без смещения (трещина) или со смещением пород по поверхности разрыва.

Гидроразрыв (гидроразрыв пласта) – один из методов интенсификации работы нефтяных и газовых скважин и увеличения приёмистости нагнетательных скважин.

Десорбция газа – испарение с поверхности твердого вещества адсорбированного на ней газа или вытеснение из жидкости поглощенных ею газов.

Длина волны – расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний частиц среды, [м].

ЕЭП – естественное электрическое поле участка земли – квазистационарное электрических полей, обусловленных естественными (не искусственными) потенциалообразующими факторами. В рамках данного отчёта в качестве последних будут учитываться только перепады механических напряжений.

Метан – природный горючий газ, встречающийся в осадочном чехле земной коры в виде свободных скоплений, в растворенном, рассеянном, сорбированном и твердом состояниях.

Период колебаний – минимальный промежуток времени, по истечении которого повторяются значения всех физических величин, характеризующих колебание, [с].

Затухание колебаний – уменьшение амплитуды колебаний с течением времени, обусловленное потерей энергии колебательной системой.

Землетрясение – подземные удары и колебания поверхности Земли, вызванные естественными причинами (главным образом тектоническими процессами) или искусственными процессами (взрывы, заполнение водохранилищ, обрушением подземных полостей горных выработок).

Интенсивность землетрясения – качественная характеристика землетрясения, оцениваемая в баллах по описательной шкале интенсивности сотрясений земной поверхности, основанной на реакции людей, строительных объектов и на изменениях природных объектов, [Дж].

Коэффициент затухания – физическая величина, обратная времени, в течение которого амплитуда уменьшается в е раз, [1/с].

Магнитуда землетрясения – величина, характеризующая энергию, выделившуюся при землетрясении в виде сейсмических волн.

Напряжённость электрического поля – векторная физическая величина, характеризующая электрическое поле в данной точке и численно равная отношению силы, действующей на неподвижный пробный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда, [В/м].

Наведенная сейсмичность – землетрясения, вызванные военной, инженерной и хозяйственной деятельностью человека, например ядерным взрывом, строительство крупных водохранилищ в сейсмоопасных регионах, нагнетанием в недра земли электромагнитной энергии, изменения пластовых давлений при нефте-, газодобыче, нагнетанием в разломы воды и т.д.

Потенциал электрического поля – работа электрического поля по перемещению единичного заряда из заданной точки в бесконечность, [В].

Резонанс – случай совпадения частот собственных колебаний и возмущающей силы.

Сейсмические волны – упругие колебания, распространяющиеся в Земле от очагов землетрясений, взрывов и других источников.

Поверхностные сейсмические волны – сейсмические волны, распространяющиеся только вдоль поверхности Земли. Скорость поверхностных волн меньше скорости поперечных волн.

Поперечные сейсмические волны – сейсмические волны, распространяющиеся медленнее, чем продольные Р-волны и состоящие из упругих колебаний, поперечных по отношению к направлению распространения волны.

Продольные сейсмические волны – наиболее быстрые волны, распространяющиеся от источника сейсмических колебаний и представляющие собой последовательное сжатие и разряжение материала.

Сейсмическая энергия землетрясений – часть энергии землетрясения, которая идет на образование сейсмических волн.

Сейсмогенерирующая зона – зона активизированного разлома или нескольких сближенных активных разломов в земной коре, подвижки по которым приводят к разрядке внутрикоровых напряжений и возникновению сейсмических волн.

Сейсмоактивная зона – зона в пределах сейсмоактивного региона, выделяемая по комплексу сейсмологических и геолого-геофизических признаков.

Сейсмическое районирование – направление сейсмологии, задача которого состоит в оценке потенциальной сейсмической опасности, выраженной в максимальной возможной интенсивности землетрясений в баллах. Оценка интенсивности землетрясений:

- основывается на результатах совместного анализа сейсмических данных о землетрясениях прошлых лет и особенностях геологического строения;
- учитывается при строительстве в сейсмических областях.

Различают:

- общее сейсмическое районирование;

- детальное сейсмическое районирование;

- сейсмическое микрорайонирование.

Детальное сейсмическое районирование – исследования по оценке сейсмической опасности, основными задачами которых является выделение сейсмогенерирующих зон и оценка параметров очагов.

Общее сейсмическое районирование – исследования по оценке сейсмической опасности обширной территории путем выделения крупных сейсмогененрирующих зон, определяющих сейсмичность районов. В результате общего сейсмического районирования составляются карты масштаба 1:2500000, позволяющие рационально планировать развитие различных районов, производить оценку общих затрат, необходимых для проведения антисейсмических мероприятий в масштабе страны.

Сейсмическое микрорайонирование – оценка сейсмической опасности, при которой:

- учитывается влияние местных грунтовых условий на интенсивность сейсмических колебаний на поверхности Земли

- определяются поправки, уменьшающие или увеличивающие сейсмичность района, задаваемую картами общего или детального сейсмического районирования.

Сейсмический мониторинг – непрерывное во времени наблюдение сейсмических событий.

Структурные блоки – часть геологической среды, расположенные между активными геологическими нарушениями; отличаются относительной консервативностью геодинамического поведения, более стабильными и выдержанными геодинамическими характеристиками.

Ведение горных работ во внутренних частях структурных блоков наиболее безопасно, развитие непредсказуемых газодинамических процессов в этих зонах маловероятно.

Зоны сопряжения геодинамически активных разломов представляют собой наиболее опасные участки недр, характеризующиеся самыми высоки-

ми рисками развития опасных геодинамических явлений, проявления горных и горно-тектонических ударов подземных горных работах, развития крупных оползней и обрушений в бортах угольных разрезов. Чем выше ранг разлома, тем сложнее его структура, и если трещины и некоторые локальные разломы могут быть представлены одной скалывающей поверхностью, то более крупные разломы организованы по типу таксономической пирамиды: глобальный разлом состоит из нескольких генеральных, т.е., в свою очередь, из серии региональных, и т.д.

Частота – число полных колебаний в единицу времени, [Гц].

Эпицентр – перпендикулярная проекция центра землетрясения на поверхность Земли.

Основные физические параметры и их размерности

V_g - газосодержание углей, м^3/ м^3;

V_s - объем сорбированного угля, м^3/ м^3 ;

V_f - объем свободного газа, м^3/ м^3 ;

P – давление газа, Па;

a_s - предельное газосодержание сорбированного газа при высоких давлениях, м^3/ м^3;

a – продоль ный и поперечный размеры блока, м;

H – высота блока, м;

$y_{\max}$ - максимальное смещение блока при резонансных колебаниях, м;

α – угол падения пластов в свите, расположенных в пределах блока;

$\sum_{i=1}^{n} m_i$ - суммарная мощность угольных пластов в свите, попадающих в рассматриваемый блок, м;

f_s =0.85 – статический коэффициент трения;

ρ – плотность горной породы, кг/м^3;

ρ_{ω} = 1000 кг/м^3 – плотность воды;

g = 9,8 м/с^2; a – размер блока по горизонтали;

H – глубина (размер блока по вертикали), м;

$y(t)$ - отклонение от положения статического равновесия, м;

$в$ – коэффициент вязкого сопротивления на границах блока (коэффициент затухания), с$^{-1}$;

ω – частота вибросейсмического источника, с$^{-1}$;

$k = \sqrt{\frac{c}{\rho H a^2}}$ - собственная частота колебаний блока, с$^{-1}$;

$c = \frac{Ea^2}{H}$ – коэффициент жёсткости пород основания, Н/м,

E – модуль Юнга пород блока, Па.

φ – величина потенциала ЕЭП, В.

$\vec{E}$, E_x, E_y, E_z – вектор напряжённости ЕЭП и его компоненты, В/м.

∇P – величина перепадов механических напряжений, Па/м.

γ – удельный вес пород, Н/м^3.

H – глубина, м.

l – расстояние до максимума потенциала, м.

m – мощность пласта, м.

x_0 – протяженность зоны отжима, м.

$\vec{H}$ – вектор напряженности магнитного поля, А/м.

$\vec{D}$, $\vec{B}$ – соответственно векторы электрического смещения и магнитной индукции, Кл/м^2 и Тл.

$\vec{j}$ – вектор плотности токов, обусловленных перемещением электрических зарядов в рассматриваемой точке среды;

δ – объемная плотность зарядов, Кл/м^3.

$\varepsilon\varepsilon_0$, $\mu\mu_0$ – абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемость вмещающего пространства Ф/м, Г/м.

ρ – удельное электросопротивление, Ом•м.

$\vec{j}_s$ – плотность «стороннего» тока, А/м^2.

Ω – объем искажения (дилатация) решетки при наличии катионной вакансии, м^3.

P_{kk} – первый инвариант тензора механических напряжений, Па.

q – заряд вакансии, Кл.

k – постоянная Больцмана, Дж/^{0}К.

T – абсолютная температура, ^{0}К.

γ – удельный вес пород, Н/м^3.

H – глубина, м.

l – расстояние до максимума потенциала, м.

m – мощность пласта, м.

x_0 – протяженность зоны отжима, м.

$n^{\pm}, \Omega^{\pm}$ – соответственно концентрация и дилатация для каждого типа носителей, м$^{-3}$, м^3.

$D^{\pm}$ – коэффициент самодиффузии дефектов положительного и отрицательного знака, м^2/с;

$\vec{i}_{\pm}$ – вектор потока точечных дефектов положительного и отрицательного знаков.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

УЭС – удельное электрическое сопротивление;

ГДП – геодинамический полигон;

КЛ – отсчет по горизонтальному углу при положении вертикального круга слева;

КП – отсчет по горизонтальному углу при положении вертикального круга справа;

ЭХЗ – электрохимическое закрепление грунтов;

ЗШО – золошлаковые отходы.

ВВЕДЕНИЕ

С ростом добычи угля и метана будет возрастать опасность возникновения динамических явлений на шахтах и разрезах Кузбасса, обусловленных повышенной сейсмичностью территорий. К таким явлениям относятся внезапное загазование шахт, горные удары, внезапные выбросы угля и газа, оползневые явления на разрезах и т.п.

Таким образом, для решения задачи безопасной и эффективной добычи угля и метана на угольных предприятиях в сейсмоопасных районах Кузбасса необходимо вести непрерывный мониторинг сейсмоопасных геодинамических процессов на шахтах и разрезах, прогнозировать опасность возникновения динамических явлений и проводить предупредительные профилактические мероприятия по борьбе с этими явлениями.

Одними из эффективных профилактических мероприятий являются методы тампонажа горных пород и пустот с полостями растворами на основе вяжущего. В случае неустойчивых влагонасыщенных глинистых пород целесообразны электрохимические способы закрепления.

Одни из перспективных направлений совершенствования методов тампонажа является разработка новых составов тампонажных растворов с использованием отходов углеобогащения и продуктов сжигания угля – золы. При этом представляется актуальной разработка новой безотходной технологии, заключающейся в приготовлении и сжигании водоугольного топлива, приготовленного из отходов углеобогащения, и последующего использования полученной золы сжигания в тампонажных растворах.

В соответствии с вышеизложенным в работе содержит порядок выполнения работ по анализу аэрофото- и космических снимков земной коры, построению карт блоковых структур, определению мест заложения геодинамических полигонов, рекогносцировке опорных пунктов геодезической сети и строительству наблюдательных станций, определению мест заложения геодинамических полигонов, рекогносцировке опорных пунктов геодезической

сети и строительству наблюдательных станций, по прогнозу сейсмоопасности метаноугольных месторождений и количественной оценке напряжений в зонах ведения горных работ и работ по добыче метана в пределах сейсмоопасных блоков земной коры, а также по прогнозу возможных динамических явлений и мерах по предотвращению этих явлений. Исследованы физико-механические свойства тампонажных растворов с использованием золошлаковых отходов от сжигания угля и водоугольного топлива. Приведены исследования в области электрохимической очистки грунтов от загрязнителей различного рода.

Настоящая работа является обобщением исследований, выполненных авторами в научно-образовательном геотехническом инновационном центре (ГИЦ) и на кафедре теоретической и геотехнической механики КузГТУ.

1. Разработка метода краткосрочного прогноза техногенных и естественных землетрясений на основе регистрации аномалий естественного электрического поля земли и возмущений атмосферно – электрического поля при активизации сейсмического режима.

1.1. Анализ космоструктурных снимков земной коры юга Кузбасса

1.1.1. Общая сейсмическая обстановка в Кузбассе за последние десятилетия

По современным представлениям, Кузнецкий бассейн и смежные с ним регионы составляют комплекс структур западной части Алтае-Саянской складчатой области, входящей в состав Урало-Монгольского подвижного пояса. Бассейн представляет собой крупную тектоническую депрессию, заполненную мощными вулканогенно-осадочными толщами, которые залегают на разнородном фундаменте. Формирование осадочно-вулканогенного комплекса продолжалось приблизительно 350 млн. дет - с раннего палеозоя по средний мезозой.

В структурном отношении недра центрального и южного Кузбасса представлены мощной угленосной толщей позднепалеозойских осадочных отложений, залегающих в центре Кузнецкой котловины и разбитых густой сетью продольных разломов. Сеть активных разломов рассекает и смежные горные системы - Кузнецкий Алатау и Салаирский кряж, окаймляющие Кузнецкую котловину с северо-востока и юго-запада.

Своими корневыми структурами большинство из этих разломов связаны с крупнейшими планетарными сейсмогенными структурами Алтае-Саянского сейсмоактивного региона. Продолжительное воздействие горных работ на эти разломы инициировали их естественные сейсмогенные проявления вокруг промышленных зон, повысили сейсмичность недр, как отклик на происходящие в Кузбассе масштабные техногенные процессы.

Недра региона поражены многочисленными системами крупных и малоамплитудных разрывных нарушений различной амплитуды в ориентации. Сложная тектоника региона является главной причиной высокой аварийности и травматизма на подземных горных работах.

При достигнутых на шахтах глубинах разработки, составляющих максимально 850 м, геодинамически активные разломы являются источниками повышенных рисков возникновения аварий, горных и горно-тектонических ударов, внезапных выбросов, внезапных обрушений кровли, и других опасных событий и явлений геодинамической природы. Явления эти сопровождаются выделением больших запасов упругой энергии, сопоставимых с энерговыделениями при мелкофокусных землетрясениях.

Происходящие на отдельных территориях области серийные сейсмические события характеризуются малой глубиной гипоцентров и вызывают ощутимую сотрясаемость земной поверхности, в связи с чем представляют опасность для проживания людей и эксплуатации экологически опасных промышленных объектов в зонах их проявления.

Произошедшая в сентябре-октябре 2003 г. серия крупных Алтае-Саянских землетрясений имела в районе их эпицентров значительные разрушительные последствия и ощущалась практически на территории всей западной Сибири. Эпицентры землетрясений находились в районе поселка Кош-Агач, в 300 км южнее границы Кемеровской области. Балльность произошедших 27 сентября и 1 октября сейсмических толчков по шкале Рихтера на территории Кузбасса составляла до 3-4.

Сейсмическое воздействие прокатившихся по Кузбассу землетрясений надолго нарушило равновесное состояние недр региона и по ряду объективных признаков вызвало необратимые изменения в строении недр. Испытавшие интенсивное влияние этих землетрясений объекты химической и металлургической промышленности, здания, сооружения, подземные выработки и затапливаемые шахты в ближайшей перспективе должны рассматриваться как зоны повышенного геодинамического риска. [5]

Кузбасс является современным сейсмоактивным регионом, где за последние 200 лет произошло около 20 крупных естественных землетрясений с магнитудой 3,6 - 6,5. А с меньшей магнитудой ежегодно фиксируются сотни землетрясений, большая часть из которых представляет собой сейсмические события низкой энергии неглубоких гипоцентров.

С середины 60-тых годов начинает сказываться новый фактор роста сейсмичности - частые сейсмические события низкого энергетического класса и малых глубин гипоцентров, продолжающийся по настоящее время в районах промышленных центров в зонах активных разломов (Междуреченск, Осинники, Полысаево, Таштагол и т.д.).

При этом активизация сейсмических процессов происходит в зонах, где ранее происходили крупные землетрясения, а в настоящее время ведется активная эксплуатация недр в условиях высокой тектонической и неотектонической нарушенности недр.

До 2000 года по сейсмическому районированию территория Кемеровской области была отнесена, в основном, к 6-балльной зоне с локальными 7-балльными участками, охватывающими густонаселенные промышленные районы.

Начиная с 2000 года, в соответствии с современными картами общего сейсмического районирования Российской Федерации практически вся территория Кемеровской области, при определенных условиях, может быть отнесена к территориям с 7- балльной сейсмичностью. Юг области – к территориям с 8-балльной сейсмичностью, с периодичностью повторения землетрясений указанной бальности порядка 100 лет.

Существенное повышение балльности Кузбасса связано с ростом показателя сейсмической активности его территории, на которой ежегодно фиксируются сотни землетрясений невысокого энергетического класса «К» (К=1,8М+4; К = lg Е, Дж).

Таким образом, в зону 8-балльной сейсмичности попали густонаселенные города юга Кузбасса – Новокузнецк, Междуреченск, Мыски, Осинники,

а также важные объекты промышленности и энергетики: Кузнецкий и Западно-Сибирский металлургические комбинаты, алюминиевый и ферросплавный заводы, Томь-Усинская и Калтанская ГРЭС, угольные шахты, обогатительные фабрики.

В Кемеровской области общая площадь сейсмических зон превышает 32 тыс. км² (порядка 33,3% общей площади), на территории которых находится 65 населенных пунктов с общей численностью населения 1756,5 тыс. чел. (59,2% общей численности населения области).

К районам с наиболее высокой степенью техногенной опасности можно отнести: Гурьевский, Прокопьевский, Новокузнецкий, Кемеровский, Таштагольский районы, города: Анжеро-Судженск, Белово, Прокопьевск, Березовский, Калтан, Кемерово, Киселевск, Осинники, Ленинск-Кузнецкий.

С января по май 2007 года произошло 22 близких землетрясения с магнитудой от 2.5 балла до 3.8 баллов (сотрясения в эпицентре достигали от 2 до 4 баллов по шкале MSK-64). Сильные близкие землетрясения в основном приурочены к Алтае-Саянской складчатой зоне. Как правило, такие землетрясения происходят в горных районах с малой численностью населения, не развитой промышленной инфраструктурой и не влекут за собой каких-либо разрушений, однако, согласно зависимости интенсивность-расстояние-магнитуда для Северной Евразии, землетрясения выше 5 баллов по шкале MSK 64 с эпицентрами в данных районах полностью определяют сейсмическую опасность для техногеннонагруженных районов, к которым относится и Кемеровская область (сотрясение от события с $M=7$ затухает до 5 баллов на расстоянии около 300 км).

Детальное изучение подобных последовательностей землетрясений в данном регионе особенно важно, поскольку в Кемеровской области исторически известны катастрофические землетрясения, повлекшие тяжелые разрушения и человеческие жертвы (Жалковский, Мучная, 1975).

Естественная сейсмичность Кузбасса долгое время оставалась вне поля зрения, так как при малой плотности сейсмической сети и большом количестве промышленных взрывов значительной мощности регистрация слабых землетрясений была затруднена. Развитие сети стационарных сейсмических станций Алтае-Саянского региона позволило в начале 80-х годов прошлого века начать работу по составлению каталогов как землетрясений (это делалось с 1963г), так и промышленных взрывов. Были обнаружены сейсмические события низких энергетических классов, записи которых не соответствовали критериям промышленных взрывов и с большей или меньшей степенью вероятности были отнесены к землетрясениям. Полученные каталоги были дополнены после пересмотра сейсмограмм с начала инструментальных наблюдений частью тех событий, которые ранее интерпретировались как взрывы и исключались из регионального каталога. Всего землетрясений оказалось около 400 в интервале энергетических классов Кр от 5 до 12.

1.1.2 Анализ материалов космоструктурного дешифрирования

На снимках из космоса с последующим дешифрированием и картографированием хорошо просматриваются для юга Кузбасса дугообразные, кольцеобразные и линейные структуры (линеаменты). Природа их связана с открытием на земном шаре системы планетарной трещиноватости. Образование ориентированной на северо-запад и северо-восток системы трещин объясняется силами, возникающими в земной коре под влиянием вращения Земли вокруг своей оси и ее движения по орбите. Часть линеаментов располагается в широтном и меридиональном направлениях. С большинством из них связаны направления речных долин. В Кузбассе это река Томь, Уса, Ольжерас. Следовательно, русла и долины этих рек можно рассматривать как гигантские разломы 1-го ранга.

Большинство исследователей утверждают, что наиболее вероятна связь тектонической активности с узлами разломов (или линеаментов) (Ранцман,

1979; Андреева и др., 1985; Жидков, 1992 и др.).

Графическим итогом многоуровневого дешифрирования аэрокосмофотоматериалов является обзорная аэрокосмоструктурная карта Кузнецкого угольного бассейна, и дежурная аэрокосмоструктурная карта масштаба 1:100000, и по отдельным участкам карты-врезки масштаба 1:25000 (рис. 1, 2). Основной рабочий масштаб соответствует аэровысотным и космическим снимкам детального уровня генерализации, разрешающая способность на местности у которых достаточно близки. Основную контурную нагрузку аэрокосмоструктурной карты составляют локальные линеаменты, разломы, т. н. кольцевые структуры (ареальные и локальные), дуговые структурные формы и криволинейные структуры.

По результатам пространственно статистической обработки контурной нагрузки аэрокосмоструктурных карт составлена схема геодинамических условий формирования структур. Выделенные на ней тектонические зоны и блоки с преобладающими условиями сжатия, растяжения или сдвиговых дислокаций характеризуется различной степенью метаморфизма углей и горно-геологических условий эксплуатации месторождений.

На предлагаемой карте (рисунок 1.1) обозначены такие узлы разломов в районе Южного Кузбасса.

На юго-востоке кольцевая структура упирается в трансрегиональную линеаментную зону северо-восточного простирания, северный отрезок которого проходит по реке Назас. По долине реки Томь через эту структуру, отсекая её южный сектор, проходит еще одна трансрегиональная линеаментная зона. Также пересекают структуру региональные линеаменты: два – широтного и один – северо-восточного простирания, наследующие долину реки Тутуяс.

На площади кольцевой структуры выделяются два геодинамических узла, образованных пересечением линеаментов и кольцевых структур разного уровня. Мощный Восточный узел, в соответствии с рисунком 1.1, сформировался недалеко от г. Междуреченска, в районе слияния рек Томь, Уса и На-

зас, где сочленяются восточные дуги трансрегиональных и региональных кольцевых структур и двух трансрегиональных линеаментных зон. Западный узел находится в районе п. Усть-Мрасский. Он образован пресечением контура трансрегиональной кольцевой структуры и трансрегиональной линеаментной зоны, проходящей по реке Томь и региональным линеаментам, трассируемым по реке Тутуяс.



Рисунок 1.1 – Космоструктурная карта Кузнецкого бассейна

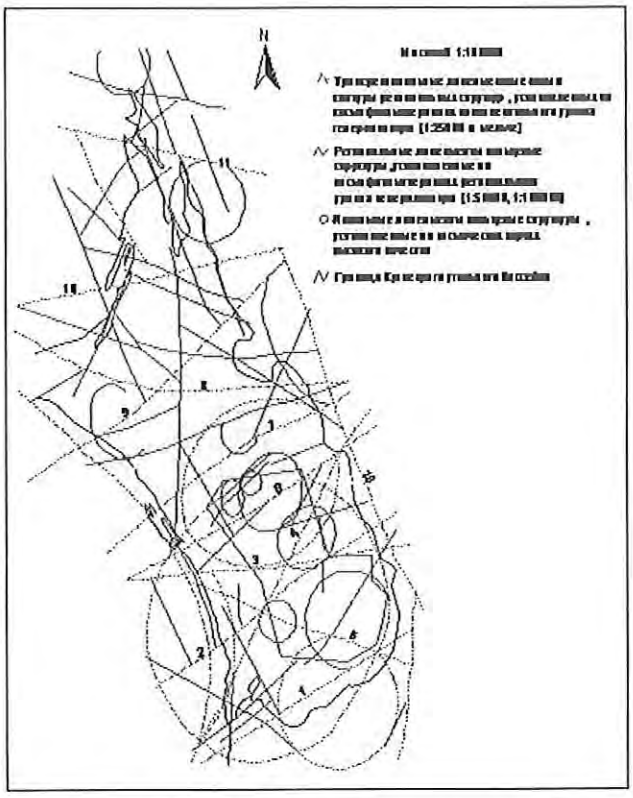


Рисунок 1.2. Аэрокосмическая карта Кузнецкого угольного бассейна
Название трансрегиональных линеаментных зон: 1 – Шубенско-Назисская, 2 – Тогульско-Канымская, 3 – Каменско-Туимская, 4 – Чумышско-Белогорская, 5 – Афонино-Тебинская, 6 – Тигунско-Ивановская, 7 – Совеско-Челобинская, 8 – Тогучинско-Барзасская, 9 – Касьминско-Кожуховская, 10 – Тогучинско-Берчикульская, 11 – Тобольско-Ангарская, 12 – Кузнецко-Салаирская, 13 – Кузнецко-Алатаутская

На западе кольцевая структура пресекает реку Чебалсу и касается правого борта ее долины, уходит на юг, где в месте слияния рек Томь, Уса и Чебалсу упирается в трансрегиональную линеаментную зону, проходящую по долине реки Томь.

Выделены структуры разного типа значимости и направления различных линеаментов, кольцевых структур, разломов.

Они представляют собой наиболее сложные по строению рельефа и тектонике участки земной поверхности. Это связано с тем, что в узлах пересекаются системы нарушений различной ориентировки, глубины заложения и кинематики.

Район подвержен интенсивной тектонической деятельности, где наблюдается быстрая смена значений природного напряжения, сейсмика, подвижки отдельных участков территории. Эта ситуация осложняется техногенной составляющей, образующейся в процессе промышленного освоения недр.

На основании аэрокосмоструктурных карт в совокупности с комплексом проведенных региональных геофизических исследований и геологоразведочных работ построены схема районирования по геодинамическим условиям формирования структур, карта линеаментов, карта плотностей линеаментов, отражающих скалывающие деформации при региональном сжатии Кузнецкого прогиба, обзорная космогеоструктурная карта (рисунок 1.2.) [9].

1.2. Разработка методики оценки сейсмоопасности и прогноза геодинамических процессов на участках метаноугольных месторождений

1.2.1 Сейсмическая обстановка на территории Кемеровской области.

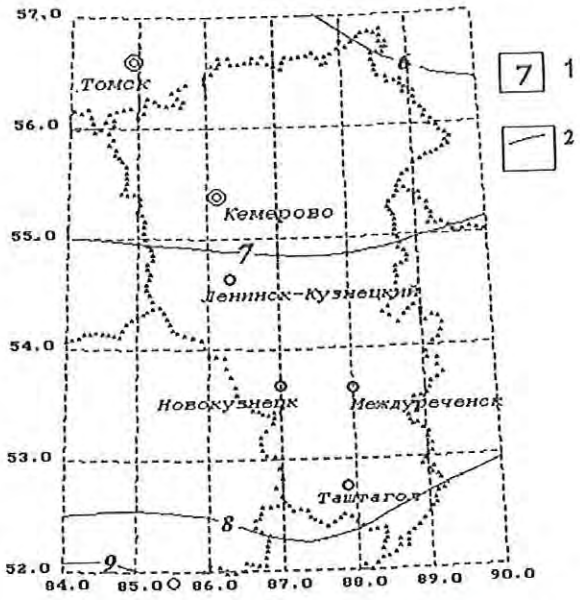


Рисунок 1.3 - Схема сейсмического райониро–вания Кузбасса на основе ОСР-97В: 1) расчетная балльность, соответствующая средней периоду 1000лет 2) изолиния балльности

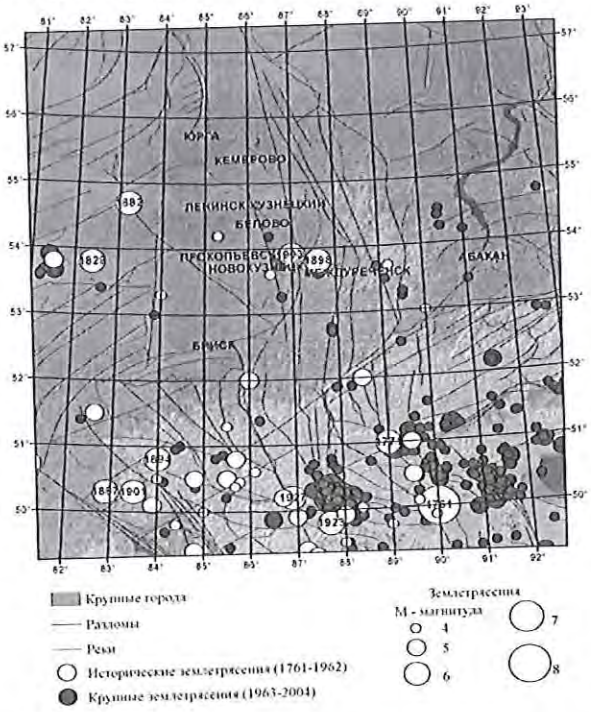


Рисунок 1.4 - Крупные землетрясения за период 1761-2004гг. с магнитудой M > 4.

Основные сейсмоактивные зоны Алтае-Саянского региона расположены в его южной и восточной части. Там исторически известны и зарегистрированы за период инструментальных наблюдений наиболее сильные землетрясения региона, относящиеся к разряду катастрофических. К их числу в частности относится Чуйское землетрясение 27 сентября 2003г, балльность в эпицентре которого оценивается как 9-10 баллов при магнитуде 7,3. Сейсмичность Кузбасса не столь высока, тем не менее, южная часть его территории на последней карте сейсмического районирования (ОСР-97) отнесена к 7-8 балльной зоне (рисунок 1.3).

Согласно этой карте вся территория Кузбасса относится к 7-балльной зоне с периодом повторения 5000 лет и вероятностью превышения указанной балльности в течение 50 лет, равной 1%. Основанием для отнесения Кузбасса, в особенности его южной части, к числу сейсмоактивных послужили как исторические данные (рисунок 1. 4.), так и современная сейсмичность, полученная по данным регистрации сейсмической сетью Алтая-Саян. Немаловажную роль в повышении уровня сейсмической опасности Кузбасса сыграла и близость границ его южной части к сейсмоактивным областям Алтая и Восточного Саяна, вследствие которой на территории Кузбасса возможен «транзитный» эффект в виде сотрясений высокого балла от землетрясений, находящихся за его пределами.

На рисунке 1.4. показаны крупные землетрясения, как за исторический период, так и за инструментальный период наблюдений. Сейсмические события происходили до начала разработок Кузбасса и имеют тектоническое происхождение.[2]

1.2.2 Сейсмическая активизация в окрестности г. Осинники

В районе г. Осинники землетрясения не редкость. Кроме того, в районе расположенного вблизи г. Новокузнецка произошли в 1898 и 1903 г.г. крупнейшие землетрясения Кузбасса. Сейсмическая активизация, вызванная тектоническими причинами для данной зоны вполне вероятна. Учитывая, что данный район - это район шахт и карьеров, наличие подземных выработок может быть причиной локальной техногенной сейсмической активизации. В районе г. Осинники 24 ноября 2005 г. была развернута локальная сеть из восьми цифровых сейсмологических станций. Сеть станций работала до конца декабря. На рисунке 1.5. представлены сейсмические события, зарегистрированные локальной сетью. Кроме сейсмических событий естественного происхождения на данной карте отмечены эпицентры большого количества промышленных взрывов. На карте наблюдается область концентрированной

сейсмичности в районе г. Осинники, в основном представленная событиями малых энергий, окруженная в основном более крупными по энергии событиями.

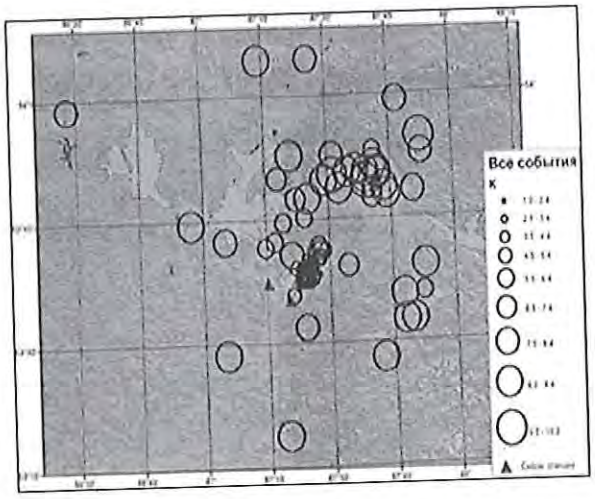


Рисунок 1.5 - Карта эпицентров событий, зарегистрированных локальной сетью около г. Осинники

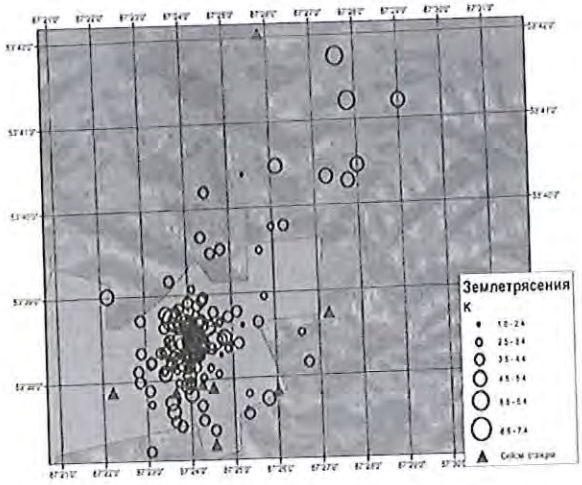


Рисунок 1.6 - Эпицентры землетрясений сейсмической активизации в г. Осинники. Период с 24 ноября по 28 декабря 2005 г.

Последние как раз и являются промышленными взрывами. За один и тот же интервал времени сейсмическая энергия, излучаемая промышленными взрывами, существенно больше суммарной сейсмической энергии землетрясений рассматриваемой активизации. Активизированная зона находится под интенсивным сейсмическим воздействием от промышленных взрывов. На рисунке 1.6. даны только землетрясения (без взрывов), зарегистрированные в рассматриваемой зоне. [3]

1.2.3 Выявление блоковых структур месторождения угля по добыче метана из скважин

В последние годы решением проблемы борьбы с динамическими явлениями на шахтах и рудниках занимается новая отрасль науки «Геодинамика недр» (И.М. Петухов, И.М. Батугина), созданная на основе обобщения зна-

ний наук о Земле, фундаментальных и технических наук. В новой отрасли горной науки применяется метод геодинамического районирования участков земной коры, в основном разработанный И.М. Батугиной, КузПИ (КузГТУ) и И.М. Петуховым, ВНИМИ, который позволяет учитывать особенности геодинамики земной коры конкретного района.

Методика включает в себя регистрацию смещений блоков земной коры I ранга с помощью системы спутниковых наблюдений GPS и нивелирования третьего класса, количественную оценку приращения деформаций и напряжений в блоках коры за эпоху наблюдений, выявление сейсмоопасных структур блоков, анализ произошедших динамических явлений на шахтах и разрезах территории, выявление опасных участков шахтных полей, количественную оценку напряжений в зонах их концентрации при ведении горных работ на основе метода измерения потенциала естественного электрического поля с земной поверхности и выдачу рекомендаций шахтам и разрезам по профилактическим мерам борьбы с динамическими явлениями.

На базе этих данных разрабатываются рекомендации и профилактические меры безопасного и эффективного освоения недр, применяемые на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации горных предприятий. В методе геодинамического районирования выделяются три основных этапа исследований.

1. Выявление блочной структуры любой территории, в том числе, территории района месторождения полезного ископаемого.

2. Оценка напряженного состояния нетронутого массива в районе месторождения.

3. Разработка рекомендаций и профилактических мер по безопасному освоению недр на всех стадиях.

Приведём **основные шаги** разработанной методики.

Шаг 1. Выявление блоковых структур I – IV рангов по топографическим картам

Шаг 1.1.1. Выделение на карте абсолютных отметок рельефа

Шаг 1.1.1.1 Первой операцией при выделении блоков рельефа является определение минимальной разницы высот исследуемой территории, достаточной для отнесения двух соседних участков к разным блокам.

Шаг 1.1.1.2 Находим на карте абсолютные максимальную и минимальную (без учета врезов речных долин) высоты рельефа. В каждом конкретном районе за минимальную разницу высот h_{min} можно принять $0{,}1 \cdot (H_{max} - H_{min})$, где H_{max} – абсолютная максимальная высота рельефа, м; H_{min} – абсолютная минимальная высота рельефа (без учета врезов речных долин), м.

Шаг 1.1.1.3 Зная минимальную разницу высот, на основе которой отделяют один блок от другого, распределяем весь диапазон отметок высот по уровням, начиная с максимальной отметки.

ПРИМЕР: $H_{max} = 1615$; $H_{min} = 585$ м; $H_{max} - H_{min} = 1030$ м. Минимальная разница высот $0{,}1 \cdot (H_{max} - H_{min}) \approx 100$ м. Тогда высоты разделятся на следующие уровни: 1 - 1600 м; 2 - 1600 – 1500 м; 3 - 1500 – 1400 м и т.д.

Шаг 1.1.2 Отметка опорных высот рельефа

Шаг 1.1.2.1 На карте отмечаются опорные высоты. К ним относятся отметки водоразделов, отчетливо выраженные горизонтальные площадки (ступени) на склонах, а также пониженные выровненные участки. Во внимание не принимаются отметки склонов и речных долин.

Шаг 1.1.2.2 Каждую выделенную высотную отметку помечаем на карте условным знаком или индексируем. Индексируются точки для того, чтобы показать, к какому уровню высот относится данный участок.

Шаг 1.1.2.3 Опорные высоты позволяют (с учетом минимальной разницы высот) оконтурить блоки линиями разломов. При выделении блоков следует придерживаться принятых высотных уровней.

Шаг 1.1.2.4 Иногда высотные отметки разных уровней, но близкие по величине находятся рядом. Эти высоты можно отнести к одному уровню в зависимости от рельефа и расположения его элементов.

Шаг 1.1.3 Проведение границ блоков

Шаг 1.1.3.1 За единый блок принимается тот участок территории, на котором разница между максимальной и минимальной отметками выделенных опорных высот не превышает определённую ранее h_{min}, и все они находятся в пределах одного принятого уровня высот.

Шаг 1.1.3.2 Выделение границ блоков осуществляется по следующим дешифрировочным признакам рельефа: подножию склонов; последовательно размещенным спрямленным участкам речных долин; перегибу склона, отделяющему тектоническую ступень от более возвышенной части; тяготению к определенной линии русел разных рек и ручьев, в результате чего, последовательно соединяя эти русла, можно получить одну линию; приуроченности коленообразных изгибов речных долин к одной общей линии; линейному расположению седловидных перегибов или уступов двух или нескольких соседних гряд; цепочке озер или болот (рисунки А.1, А.2). Наиболее достоверно выделяются блоки линиями разломов, которые проходят по разнородным признакам.

Шаг 1.1.3.3 Всей поверхности блока условно приписывается отметка наивысшего в его пределах участка, тем самым, как бы восстанавливаем первичные формы рельефа без учёта степени его изрезанности (денудационных изменений).

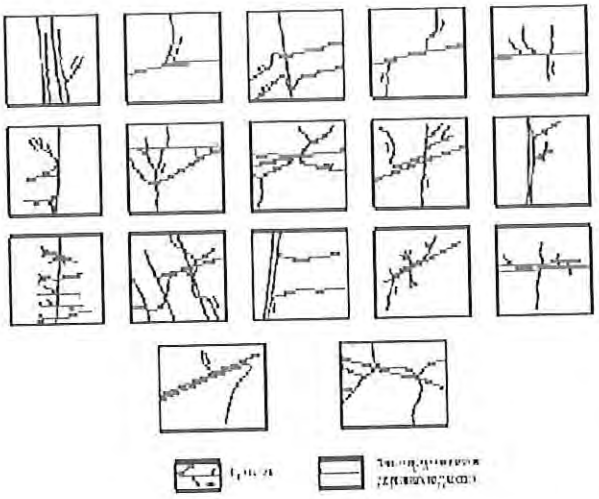


Рисунок 1.7 – Геоморфологические признаки, позволяющие выделить разрывные нарушения по руслам рек (по Г. И. Раскатову)

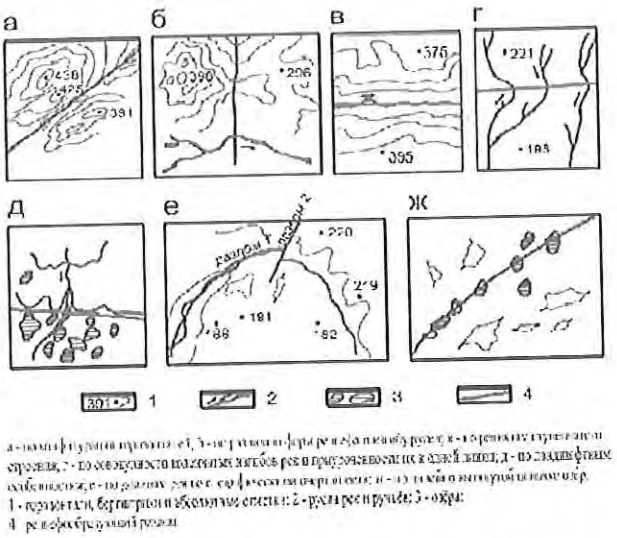


Рисунок 1.8 – Оконтуривание блоков тектонического рельефа в районах с небольшой относительной разницей высот отдельных участков местности

Шаг 1.1.4 Реконструкция линий разломов

Шаг 1.1.4.1 В результате выделения и оконтуривания блоков исследуемая территория разбивается на блоки разной формы, разных размеров и разной абсолютной высоты. Полученная схема блоков является основой для реконструкции линий разломов, определения амплитуды для каждого из разломов, установления знака перемещения блоков по этим разломам.

Шаг 1.1.4.2 Разломы выделяются по карте блоковых структур последовательно: вначале непрерывные, затем смещённые и разорванные. Контуры некоторых блоков на схеме блоковых структур образуют прямолинейную или плавно закругленную линию, проходящую через всю исследуемую площадь. Таких протяжённых линий может быть одна, две, три, реже больше.

Шаг 1.1.4.3 После выделения непрерывных линий разломов выявляются разломы, непрерывность которых уже нарушена разломами, выделившимися в первую очередь. Достоверность выделенных разломов должна подтверждаться выдержанностью соотношения высот по линиям разломов.

Шаг 1.1.4.4 Для выделения разломов необходимо определить фактическую разницу высот между блоками по границам всех блоков. Учитывая

фактические разницы высот блоков можно выяснить, какие участки линий, оконтуривающих блоки принадлежат тому или иному разлому. При этом, как правило, должно сохраняться соответствующее соотношение высот блоков по линии разлома. Но это положение часто нарушается, потому что на некоторых участках происходило несколько подвижек блоков по одному и тому же разлому, изменивших соотношение высот.

Шаг 1.1.5 Определение амплитуды относительных блоковых перемещений

Шаг 1.1.5.1 Амплитуда относительного перемещения блоков для каждого разлома определяется там, где линия разлома проходит одна, не совмещаясь с другими. Вычисляется амплитуда путем сравнения высот всех соответствующих граничных блоков. Суммарная амплитуда совмещенных разломов должна соответствовать фактической разнице абсолютных отметок, граничащих по ним блоков.

Шаг 1.1.5.2 За амплитуду того или иного разлома принимают величину, равную наибольшему значению амплитуд. Производится корректировка амплитуд для тех участков, на которых совмещены несколько разломов. Следует заметить, что после корректировки могут сохраняться отдельные блоки, высота которых будет резко изменяться. Это могут быть или реликтовые возвышенности, или впадины.

Шаг 1.1.6 Определение знака перемещения блоков

Шаг 1.1.6.1 Знак перемещения блоков предварительно можно определить по конфигурации линии разлома. Если разломы параллельны или симметрично расходятся и являются зеркальными по отношению друг к другу, то они оконтуривают грабен или горст. В этом случае перемещалась внутренняя группировка блоков. Если разлом имеет тенденцию к замыканию или замыкает какой-то участок, то он тоже указывает на перемещение блоков, находящихся в замкнутом контуре.

Шаг 1.1.6.2 При линейной вытянутости разлома невозможно определить первым способом, какой блок перемещался по соответствующему разлому. Этот вопрос решается с помощью уравнений, в которые входит значение фоновой высоты. Под фоновой высотой понимается условная средняя абсолютная высота современной поверхности до начала рельефообразующих движений блоков.

Шаг 1.1.6.3 Определяется значение фоновой высоты путём выбора наиболее стабильного блока, который или не перемещался, или перемещался реже других блоков по уже дешифрированным разломам с известными амплитудой и знаком перемещений. Высота такого блока (с соответствующей поправкой, если он перемещался) и принимается за фоновую высоту.

Шаг 1.1.6.4 Далее, для каждого разлома берётся по блоку по одну и другую сторону от него. При этом должно выполняться одно условие – для всех разломов, кроме дешифрируемого, амплитуда и знак перемещения должны быть определены. После чего составляются уравнения, по одному уравнению для каждого блока. Эти уравнения характеризуют перемещение блоков относительно друг друга по дешифрируемому разлому. Уравнения имеют следующий вид:

$$Нбл_1 = h_ф + h_1 + h_2 + \ldots + h_n + У; \quad (1.1)$$

$$Нбл_2 = h_ф + h_1 + h_2 + \ldots + h_n + Х, \quad (1.2)$$

где $Нбл_1$ и $Нбл_2$ – абсолютные отметки условной поверхности первого и второго блоков соответственно, $h_ф$ – фоновая высота рельефа, м; h_1, h_2, … h_n – амплитуды перемещения данного блока по уже установленному разлому числом n, м; У – величина перемещения первого блока по дешифрируемому разлому, м; Х – величина перемещения второго блока по этому же разлому, м.

Шаг 1.1.6.5 В уравнениях должны учитываться не только разломы, проходящие непосредственно между этими двумя блоками, но и разломы, по которым оба блока перемещались вместе как единое целое. Величина ампли-

туды таких разломов должна с соответствующим знаком входить в оба уравнения.

Шаг 1.1.6.6 Принимается, что по любому выявленному разлому перемещался один блок, а второй оставался стабильным. Если верно определены входящие в уравнения амплитуды и знаки перемещения блоков, то величина или X, или У должна быть равна нулю. К нулю приравнивают величины, не превышающие половины значения принятой ранее минимальной разницы высот (h_{min}).

Шаг 1.1.7 Проверка полученных результатов

Шаг 1.1.7.1 Правильность полученных результатов проверяется двумя способами. Во-первых, по следующей формуле

$$H_p = h_ф + h_1 + h_2 + \ldots + h_n, \quad (1.3)$$

где H_p – расчетная высота блока, м; $h_ф$ – фоновая высота, м; h_1, h_2, … h_n – амплитуда перемещения блока по соответствующим разломам, м. По этой формуле определяется расчетная высота каждого блока. Затем расчетная высота сравнивается с фактической высотой соответствующего блока.

Шаг 1.1.7.2 Второй способ проверки состоит в построении профилей, отображающих движения блоков. В качестве окончательной проверки рекомендуется сопоставление профилей поверхности – фактического профиля, отражающего современный рельеф и профиля, построенного по расчётам. Если полученные фактический и расчётный профили будут совпадать, следовательно, дешифровка сети разломов произведена верно.

Шаг 1.1.7.3 Следует заметить, что для территорий с малыми перепадами абсолютных высот рельефа, вероятно, можно будет выделить только схему блоков. С определением характеристик блоковых структур (амплитуда разломов, знаки перемещения блоков, группировки блоков и др.) возникают затруднения из-за незначительной разницы абсолютных отметок условных поверхностей блоков. На картах, отображающих малоконтрастные террито-

рии, основными ориентирами для оконтуривания блоков будут служить элементы гидросети и рисовка горизонталей.

Шаг 1.1.8 Оценка точности выявления блоковых структур по картам

Шаг 1.1.8.1 Погрешность результатов исследований по картам зависит от множества самых разнообразных факторов. Применение приемов теории ошибок и математической статистики позволяет дать количественную оценку одним факторам, другие факторы такой оценке не поддаются. Единых универсальных критериев точности, научной достоверности результатов исследований не существует, потому что карты используются при решении разных научных и практических задач.

Шаг 1.1.8.2 К основным факторам, определяющим точность исследований по картам, относятся цели и задачи исследования, картографическая точность, техническая точность, уровень точности исследований, истинность исходных теоретических представлений, положенных в основу исследования.

Шаг 1.1.9 Картографическая точность исследований

Шаг 1.1.9.1 Картографическая точность – точность привлекаемых для исследования карт, которая зависит от математической основы, масштаба карты, ее современности, достоверности, полноты содержания, от степени генерализации изображения, технологии составления и издания карты и т.п. Погрешности результата определяются свойствами самой карты. Для топографических карт крупных и средних масштабов общая ошибка положения контуров складывается из множества элементарных ошибок. Это ошибки определения плановых координат пунктов государственной геодезической сети, погрешности полевых съемочных работ, графические неточности при составлении карты, дефекты полиграфического характера и т.д.

Шаг 1.1.9.2 На топографических картах ошибки планового положения контуров, вызванные погрешностями разного рода, включая генерализацию, находятся в среднем в пределах от 0,5 до 0,75 мм. Они увеличиваются для

горных районов и уменьшаются для равнинных. Ошибки высотного положения контуров связаны с принятым сечением горизонталей и различны для равнинных, среднегорных и высокогорных территорий. В среднем они составляют 0,3 ÷ 0,5 h, где h – высота сечения рельефа на карте. Предельные ошибки в положении контуров не превышают удвоенных средних величин.

Шаг 1.1.10 Техническая точность исследований

Шаг 1.1.10.1 Техническая точность исследования – точность измерительных инструментов, приборов, вычислительной техники и т.п. Она зависит от погрешностей, вносимых в исследования по картам за счет несовершенства технических приемов и инструментов.

Шаг 1.1.10.2 Для оценки технической точности необходимо иметь представление об объеме измерений, их плотности и репрезентативности, группировке, о способах математической обработки. При общей характеристике результатов измерений и вычислений по картам учитывают совокупное влияние картографической и технической ошибок.

Шаг 1.1.10.3 Нередко ошибки в положении контуров, высот, количественных градаций значительно превосходят технически достижимую точность измерений. Особенно это заметно на тематических картах, где большое влияние на точность результата оказывает еще и принятый способ изображения. Некоторые оценки точности количественных определений по тематическим картам приведены в таблице 1.1. Из таблицы 1.1 видно, как распределяются средние величины ошибок для разных способов изображения. В зависимости от размера знака, масштаба карты, способа измерения и других факторов величины ошибок значительно меняются. Но в целом можно принимать в расчет именно такой порядок величин.

Таблица 1.1- Оценка точности количественных определений по картам

Способ изображения явления	Ошибки количественных определений
Знаки ступенчатой шкалы, картограммы, картодиаграммы	33%
Знаки абсолютной непрерывной шкалы	3-6%
Структурные значки, локализованные диаграммы	5-10%
Способ изображения явления	Ошибки количественных определений
Знаки движения:	
ширина знака	2,5-5%
азимут знака	0,8-1,6°
Изолинии (горизонтали)	0,1-0,2 величины отстояния

Шаг 1.1.11 Уровень точности исследований

Шаг 1.1.11.1 Все картографические исследования по точности можно разделить на точные, исследования средней точности и приближенные исследования.

Шаг 1.1.11.2 Точные исследования предполагают получение измерений, вычислений и конечных результатов с максимально возможной точностью для данной карты и данного приема ее анализа. При точных исследованиях погрешности измерения длин и площадей по картам не превышают 1 %, а углов – 1°.

Шаг 1.1.11.3 Исследования средней точности проводятся, когда по условиям работы считается, что ошибка результата не должна превышать определенного допустимого предела, а погрешности, которые существенно меньше заданной точности, не учитываются. Погрешности определения длин и площадей при измерениях средней точности доходят до 3 – 5 %, а углов –

до 3°. Ученые считают [1, 2, 3, 4], что в практических приложениях картографического метода такой уровень точности является вполне удовлетворительным.

Шаг 1.1.11.4 Приближенные исследования обычно необходимы для предварительных оценок и выполняются с невысокой точностью. Погрешности определения длин и площадей при этом составляют 6 – 10 %, а углов – до 8°. Приближенные определения позволяют правильно спланировать дальнейшие более точные исследования.

Шаг 1.1.12 Ранжирование блоков земной коры

Шаг 1.12.1 Выделение блоков I ранга осуществляется по топографическим картам масштаба 1:2500000.

Шаг 1.1.12.2 Блоки II ранга выделяются внутри блоков I ранга путем переноса границ блоков I ранга на карту масштаба 1:1000000. Уточнение границ блоков II ранга производится по карте 1:500000 в связи с ее большей разрешающей способностью.

Шаг 1.1.12.3 Контуры блоков II ранга переносятся с карты масштаба 1:500000 на топографическую карту масштаба 1:100000. Внутри блоков II ранга по данной карте выделяются блоки III ранга.

Шаг 1.1.12.4 Блоковые структуры IV ранга определяются по топографическим картам масштаба 1:25000 внутри блоков III ранга.

Шаг 1.2 Измерения координат наблюдательных станций в пределах блоковых структур I-IV рангов путем угловых измерений, нивелирования 3 класса и спутниковых наблюдений.

Шаг 1.2.1 Измерения горизонтальных направлений способом круговых приемов и обработка результатов. Точность результатов измерений.

Шаг 1.2.1.1 Все угловые и линейные измерения осуществляются электронным тахеометром Trimble 3601DR. Измерения проводятся как с туров,

так и с марок-дублеров. Над марками устанавливается штатив, тахеометр и отражатели, которые центрируются с помощью встроенных оптических отвесов. Конструкция туров предполагает навинчивание трегеров прибора и отражателей на становой винт тура, что позволяет избежать ошибок за редукцию и центрировку. Измерения с тура – первая программа, с марок – вторая. Все пункты имеют номера и названия.

Шаг 1.2.1.2 Угловые измерения проводятся способом круговых приёмов и отдельного угла.

Шаг 1.2.1.3 Способ круговых приёмов заключается в следующем.

а) устанавливают тахеометр, центрируют (если производится измерения с марок), нивелируют, поворачивают 1–2 раза по часовой стрелке для придания устойчивости и наводят на начальное направление. Наведение выполняют при КЛ(отсчет по горизонтальному углу при положении вертикального круга слева);

б) ставят установку лимба для 1-го приёма 0°00'00";

в) проверяют точность наведения и берут отсчёт (2 наведения с расхождением не более 3");

г) наводят по часовой стрелке на следующие направления и берут отсчёты. Расхождение отсчётов на начальном направлении называется «незамыкание горизонта» (допуск не более 4");

д) меняют положение круга, вращая при этом тахеометр против часовой стрелки, наводят на начальное направление и берут отсчёт;

е) вращая против часовой стрелки, берут отсчёты на всех направлениях. Запись в журнал идёт снизу вверх. Вычисляют незамыкание при КП(отсчет при положении вертикального круга справа). Если незамыкание при КЛ и КП превышают допуск, то наблюдения начинают сначала;

ё) вычисляют значение

$$2C = КЛ - (КП \pm 180°), \quad (1.4)$$

по всем направлениям $\Delta 2C \leq |12"|$;

ж) переходят к следующему приёму, для чего на начальное направление

ставят новую установку лимба. Перестанавливают лимб между приемами на величину

$$\Delta = 180^0/m, \tag{1.5}$$

где m – число приемов. В конце каждого приёма вычисляют средние значения направлений и приводят их к начальному.

Расхождение направлений из разных приёмов не должно быть более 6".

Шаг 1.2.1.4 Правила повторных наблюдений и обработка результатов.

Если более 30% измерений направлений превышают допуск, повторяют всю программу снова. Если менее 30% разрешается выполнить перенаблюдения отдельных приёмов. Общее число направлений при повторных измерениях должно быть не менее трех.

Шаг 1.2.1.5 Если результат повторного наблюдения удовлетворяет допуску, а от основного значения отклоняется больше 6", то в обработку принимают повторный результат и вычёркивают основной.

Шаг 1.2.1.6 Если результаты повторных измерений не отличаются от основных больше 6", а среднее из основных и повторных так же не превышают допуска, в обработку включают среднее значение, вычёркивая основное и повторное.

Шаг 1.2.1.7 Оценку точности результатов измерений производят следующим образом.

По каждому направлению находят среднее значение, считают отклонение от среднего V. Выписывают суммы значений отклонений с «+» и с «-». Контроль

$$\sum V = 0.0 \pm 0.2'' . \tag{1.6}$$

Находят $\sum|V|$ по всем направлениям. Находят среднюю квадратическую погрешность по измеренным направлениям

$$\mu = \frac{K\sum|V|}{n}, \tag{1.7}$$

где n – число направлений,

$$K = \frac{1.25}{\sqrt{m(m-1)}}. \quad (1.8)$$

Указанная погрешность не должна превышать инструктивной погрешности для данного класса (m_β для 3 класса 1,5").

Шаг 1.2.2 Измерение горизонтальных углов способом отдельного угла и обработка результатов

Шаг 1.2.2.1 Способ отдельного угла заключается в следующем.

а) Устанавливают теодолит на точке и приводят в рабочее положение;

б) наводят при КЛ на заднюю по ходу точку и ставят установку лимба первого приёма. Установки рассчитывают так же, как и в круговых приёмах;

в) проверяют наведение и берут отчёт КЛ;

г) вращая по часовой стрелке, наводят на следующее направление и берут отчёт КЛ;

д) продолжая вращать теодолит по часовой стрелке, меняют положение зрительной трубы и при КП наводят на 2-ю точку. Берут отсчёт КП;

е) продолжая вращать по часовой стрелке, наводят на первую точку и берут отсчёт КП;

ё) вычисляют значение угла

$$\beta_{кл} = КЛ_3 - КЛ_1. \quad (1.9)$$

ж) вычисляют

$$\beta_{кп} = КЛ_1 - КЛ_3. \quad (1.10)$$

з) контроль осуществляют по формуле

$$\beta_{кл} + \beta_{кп} - 360° < 6", \quad (1.11)$$

если условие выполняется, вычисляют среднее значение левого по ходу угла по формуле

$$\beta_{ср} = \frac{\beta_{кл} + 360^0 - \beta_{кп}}{2}. \quad (1.12)$$

и) сравнивают значение средних углов из всех приёмов, оно не должно превышать из разных приёмов 6".

Шаг 1.2.2.2 Для оценки точности находят среднее значение угла из m приёмов, отклонение от среднего, контроль

$$\beta_{ср} = \frac{\sum \beta}{m}, \quad V_i = \beta_i - \beta_{ср}, \quad \sum V_i = 0. \tag{1.13}$$

Шаг 1.2.2.3 Если в первом приёме все вращения выполняются по часовой стрелке, то во втором приёме все вращения теодолита производятся против часовой стрелки.

ПРИМЕР: Сводка уравнивания отдельного угла

Вывод среднего направления на пункте Поляна (3)

Начальное направление Береговой (4)

Конечное направление Горелый (1)

Результаты измерений представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2- Результаты измерений

Дата наблюдения	№ приема	Установка лимба	Береговой (4)		Горелый (1)		Наблюдение колебания
		o /	o / //	v	O / //		$\Delta\beta$"
14.09.06	I	0 00	0 0 0.0	0	13 39 19.5	0.5	0
	II	60 00	0.0	0	19.8	0.8	– 4.3
	III	120 00	0.0	0	17.6	1.4	+ 1.3
$\sum v^2 = 2.85$ Оценка точности: $m_\beta = \sqrt{\frac{\sum V_i^2}{m-1}} = 1.19$"					Среднее 19.0" $\sum + = 1.3$ $\sum - = 1.4$		

Значения направлений представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3- Значения направлений

Названия направлений	Среднее значение направлений	Число направлений и приёмов, оценка точности
Береговой (4)	$0^0 00' 00.0''$	n=2
Горелый (1)	$13^0 39' 19.0''$	m=3
		$m_\beta = 1.19''$

Шаг 1.2.3 Нивелирование 3 класса

Шаг 1.2.3.1 Нивелирование через речную преграду проводится при двух станциях и двух приёмах с изменением высоты инструмента для каждой станции. При большой длине плеча на заднюю рейку по сигналу измерителя закрепляют изоленту на целом делении, и сообщают это значение измерителю. После чего измеритель с помощью барабанчика находит значение отсчёта. Нивелирование выполняется нивелиром Ni002, рейками с инварной вставкой и полудециметровыми делениями основной и дополнительной шкалы.

Шаг 1.2.4 Спутниковые наблюдения с помощью GPS-приемников и обработка результатов

Шаг 1.2.4.1 Спутниковые наблюдения осуществляются с целью уточнить координаты наблюдательных станций и реперов, расположенных в пределах блоковых структур I–IV рангов и вторым независимым способом оценить погрешность оценки смещений блоковых структур.

Шаг 1.2.4.2 Измерения осуществляются с помощью GPS-приемников, устанавливаемых и закрепляемых на металлических плитах наблюдательных станций.

Шаг 1.2.4.3 Обработка результатов наблюдений производится на ПЭВМ с помощью специальных программ, поставляемых вместе с аппаратурой.

Шаг 1.3 Оценка главных деформаций и напряжений блоковых структур I-IV рангов по результатам измерения их смещений

Шаг 1.3.1 По результатам определения измерений координат наблюдательных станций за эпоху наблюдений определяются их среднегодовые смещения.

Шаг 1.3.2 Смещения разлагаются на три компоненты u, v, w в декартовой системе координат (y – направление «юг-север», x – направление «запад-восток», z – вертикальная координата).

Шаг 1.3.3 Находим компоненты тензора деформаций блоковых структур e_{ij}:

$$e_{11} = \frac{\begin{vmatrix} u_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ u_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ u_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ u_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix}}{\Delta}; \quad e_{12} = \frac{\begin{vmatrix} x_1 & u_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & u_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & u_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & u_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix}}{\Delta}; \quad e_{13} = \frac{\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & u_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & u_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & u_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & u_4 & 1 \end{vmatrix}}{\Delta};$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix},$$

где x_i, y_i, z_i – координаты пункта наблюдения с номером i; u_i, v_i, w_i – соответствующие пункту i смещения.

$$e_{21}=\frac{\begin{vmatrix} v_1 & y_1 & z_1 & 1\\ v_2 & y_2 & z_2 & 1\\ v_3 & y_3 & z_3 & 1\\ v_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix}}{\Delta};\quad e_{22}=\frac{\begin{vmatrix} x_1 & v_1 & z_1 & 1\\ x_2 & v_2 & z_2 & 1\\ x_3 & v_3 & z_3 & 1\\ x_4 & v_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix}}{\Delta};\quad e_{23}=\frac{\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & v_1 & 1\\ x_2 & y_2 & v_2 & 1\\ x_3 & y_3 & v_3 & 1\\ x_4 & y_4 & v_4 & 1 \end{vmatrix}}{\Delta};$$

$$e_{31}=\frac{\begin{vmatrix} w_1 & y_1 & z_1 & 1\\ w_2 & y_2 & z_2 & 1\\ w_3 & y_3 & z_3 & 1\\ w_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix}}{\Delta};\quad e_{32}=\frac{\begin{vmatrix} x_1 & w_1 & z_1 & 1\\ x_2 & w_2 & z_2 & 1\\ x_3 & w_3 & z_3 & 1\\ x_4 & w_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix}}{\Delta};\quad e_{33}=\frac{\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & w_1 & 1\\ x_2 & y_2 & w_2 & 1\\ x_3 & y_3 & w_3 & 1\\ x_4 & y_4 & w_4 & 1 \end{vmatrix}}{\Delta}.$$

Шаг 1.3.4 Записываем матрицу деформаций и разлагаем её на симметричную и кососимметричную части:

$$\begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13}\\ e_{21} & e_{22} & e_{23}\\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13}\\ a_{21} & a_{22} & a_{23}\\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13}\\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23}\\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} \end{pmatrix},$$

где $a_{ij}=0{,}5\left(e_{ij}+e_{ji}\right);\quad \omega_{ij}=0{,}5\left(e_{ij}-e_{ji}\right);\quad j,i=1,2,3.$

Шаг 1.3.5 Составляем характеристическое уравнение для нахождения главных значений тензора деформации

$$\lambda^3-J_1\cdot\lambda^2+J_2\cdot\lambda-J_3=0, \tag{1.14}$$

где $J_1=a_{11}+a_{22}+a_{33};\ J_2=\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12}\\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}+\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23}\\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}+\begin{vmatrix} a_{11} & a_{13}\\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix};$

$$J_3=\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13}\\ a_{21} & a_{22} & a_{23}\\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix};\ a_{ij}=0{,}5\left(e_{ij}+e_{ji}\right);\quad j,i=1,2,3.$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\lambda_1=2\sqrt{\left(-\frac{P}{3}\right)}\cdot cos\left(\frac{\alpha}{3}\right)+\frac{J_1}{3};$$

$$\lambda_2=\sqrt{\left(-\frac{P}{3}\right)}\cdot cos\left(\frac{\alpha}{3}+\frac{2\pi}{3}\right)+\frac{J_1}{3};$$

$$\lambda_3 = 2\sqrt{\left(-\frac{P}{3}\right)}\cdot cos\left(\frac{\alpha}{3}-\frac{2\pi}{3}\right)+\frac{J_1}{3};$$

$$cos(\alpha) = -\frac{q}{2\sqrt{-\left(\frac{P}{3}\right)^3}},$$

где $P = -\frac{J_1^2}{3}+J_2;\quad q = -2\left(\frac{J_1}{3}\right)^3+\frac{J_1\cdot J_2}{3}-J_3;\quad \lambda_{1,2,3}$ – главные деформации блока.

А.1.3.6 Находим главные направления деформаций блока. Полагая A_{1z}=1, находим

$$A_{1x} = \frac{\Delta_x}{\Delta_z} = \frac{\begin{vmatrix}(a_{22}-\lambda_1) & a_{23}\\ a_{32} & (a_{33}-\lambda_1)\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}a_{21} & (a_{22}-\lambda_1)\\ a_{31} & a_{32}\end{vmatrix}};\ A_{1y} = \frac{\Delta_y}{\Delta_z} = \frac{\begin{vmatrix}a_{23} & a_{21}\\ (a_{33}-\lambda_1) & a_{31}\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}a_{21} & (a_{22}-\lambda_1)\\ a_{31} & a_{32}\end{vmatrix}}. \qquad (1.15)$$

А.1.3.7 Косинусы углов между первым главным направлением деформации блока и осями *ox, oy* и *oz* соответственно находят по формулам

$$cos\,\alpha = \frac{A_{1x}}{\sqrt{A_{1x}^2+A_{1y}^2+A_{1z}^2}};$$

$$cos\,\beta = \frac{A_{1y}}{\sqrt{A_{1x}^2+A_{1y}^2+A_{1z}^2}}; \qquad (1.16)$$

$$cos\,\gamma = \frac{A_{1z}}{\sqrt{A_{1x}^2+A_{1y}^2+A_{1z}^2}},$$

где A_{1z}=1.

Второе и третье главные направления находим из (А.17) с заменой λ_1 на λ_2 и λ_3.

Шаг 1.3.8 Находим углы поворота блока вокруг осей *oz, oy, ox* соответственно по формулам

$$\omega_{xoy} = \frac{1}{2}(e_{21}-e_{12});$$

$$\omega_{xoz} = \frac{1}{2}(e_{13} - e_{31}); \tag{1.17}$$

$$\omega_{yoz} = \frac{1}{2}(e_{32} - e_{23}).$$

Шаг 1.3.9 Главные напряжения блоков находим по формулам закона Гука

$$\sigma_1 = \frac{E[(1-\nu)\lambda_1 + \nu(\lambda_2 + \lambda_3)]}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\sigma_1 = \frac{E[(1-\nu)\lambda_2 + \nu(\lambda_1 + \lambda_3)]}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{1.18}$$

$$\sigma_1 = \frac{E[(1-\nu)\lambda_3 + \nu(\lambda_1 + \lambda_2)]}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

где E – среднее значение модуля Юнга пород рассматриваемого блока; ν – коэффициент Пуассона.

Шаг 1.3.10 Графически наносим поля главных напряжений на карту блоковых структур I-IV рангов.

Шаг 1.3.11 Проводим анализ напряженно-деформированного состояния блоков I-IV рангов.

Шаг 1.3.12 Если величина дополнительных напряжений блоков, обусловленных их среднегодовыми смещениями, в 3-5 раз меньше уровня напряжений, снимаемых при крупных ударах горно-тектонического типа или землетрясениях (25-150 МПа), участки шахтных полей и разрезов, расположенных в данных блоках, неопасны по динамическим явлениям.

Шаг 1.3.13 В тех случаях, когда величина дополнительных напряжений близка к уровню, приведенному выше, на шахты и разрезы, поля которых расположены в пределах тектонически напряженных блоков, выдается предупреждение о возможных динамических явлениях.

Дальнейшее уточнение границ сейсмоопасных участков шахтных полей и действующих напряжений на этих участках производится в соответствии с изложенными положениями из следующего параграфа.

Шаг 1.4 Анализ динамических явлений и сейсмических событий в пределах сейсмоопасных блоков земной коры.

Шаг 1.4.1 После выявления тектонически напряженных блоков земной коры согласно п. А.1.3 настоящей методики, производится анализ произошедших на шахтах и разрезах территории динамических явлений и сейсмических событий в пределах того блока, в который попадают данные предприятия.

Шаг 1.4.2 Эпицентры событий наносятся на карту блоковых структур данной территории.

Шаг 1.4.3 Производится анализ горно-геологических и горнотехнических условий разработки месторождения, а также физико-механических свойств и газоносности угольных пластов, с учетом сейсмоопасности блоковых структур. Выявляются опасные участки шахтных полей, на которых в силу их сейсмоопасности и технологии ведения горных работ, могут происходить горные удары, внезапные выбросы угля и газа и внезапные загазования шахт.

Шаг 1.4.4 Такие участки наносятся на карту масштаба 1:25000.

Шаг 1.4.5 На выявленных опасных участках шахтных полей производится оценка концентрации механических напряжений на основе метода измерения потенциала естественного электрического поля с земной поверхности.

1.3. Разработка прогнозных карт сейсмоопасности участков метаноугольных месторождений Кузбасса

Приведём **пример** построение блоковых структур I – IV рангов для исследуемого месторождения ООО «Газпром добыча Кузнецк»

С целью повышения безопасности и эффективности отработки новых углеметановых площадей было последовательно выполнено геодинамическое районирование Кузбасса, Ерунаковского района, Талдинского месторождения и промплощадки, вводимой в эксплуатацию в первую очередь.

Выделение блоков проводилось по вышеизложенной методике. Топографической основой для выявления блоковых структур 1 ранга послужила Карта Мира масштаба 1 : 2 500 000.

Сначала по формуле $h_{\min} = 0{,}1 \cdot (H_{\max} - H_{\min})$ определили минимальную разницу высот на данной территории, достаточную для отнесения двух соседних участков к разным блокам. На исследуемой площади высотные отметки разбились на одиннадцать уровней.

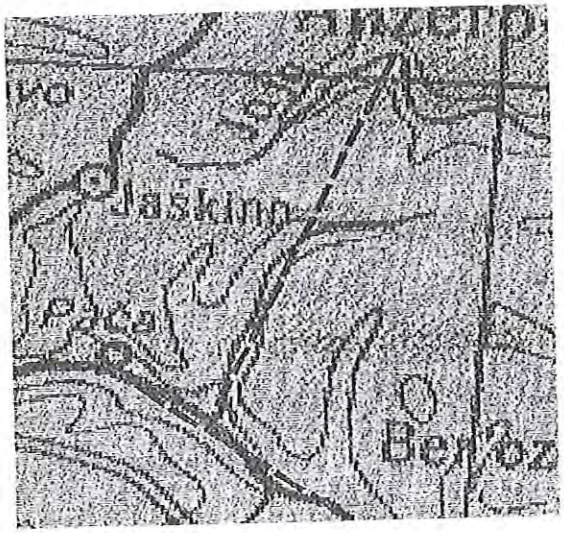


Рисунок 1.9 - Проведение линии разлома по одной речке и характерному изгибу другой речки



Рисунок 1.10 - Проведение линии разлома по серии коленообразных изгибов речных долин разных рек, тяготеющих к определенной линии

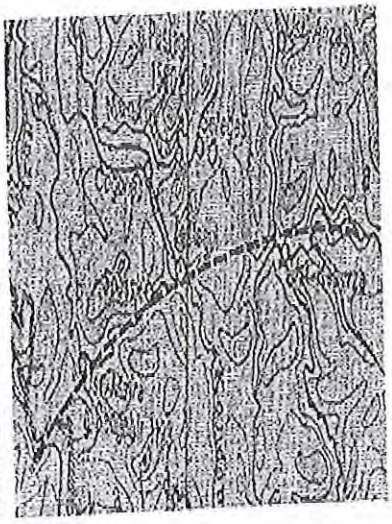


Рисунок 1.11 - Проведение линии разлома по совокупности последовательно расположенных долин разных рек, коленчатого изгиба речной долины и изогнутого участка реки

Далее по карте выбирались и на кальку переносились опорные высотные отметки. К ним были отнесены отметки водораздельных поверхностей, отчетливо выраженные горизонтальные площадки (ступени) на склонах гор, а также пониженные выровненные участки. Учитывая H_{min} , выделенные высотные отметки индексировались в соответствии с их величиной, для того, чтобы показать, к какому уровню высот относится тот или иной участок и определить его границы.

После анализа распределения высотных отметок разделили всю территорию на участки, в пределах которых находятся высоты рельефа одного рельефа. Оконтуривание блоков осуществлялось по известным дешифрировочным признакам рельефа. Некоторые примеры проведения границ блоков с учетом размещения гидрографической сети показаны на рисунках 1.9 – 1.11.



Рисунок 1.12. - Фрагмент блокового строения 2 ранга площади Ерунаковского геолого-экономического района

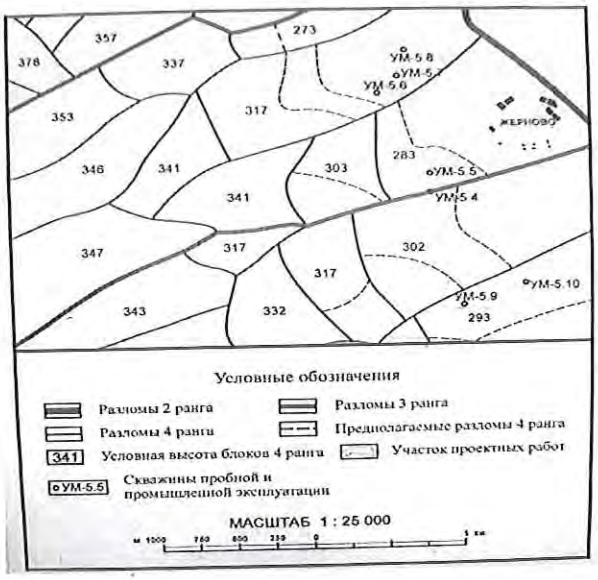


Рисунок 1.13 - Фрагмент блоковой структуры 4 ранга площади Ерунаковского геолого-эко–номического района



Рисунок 1.14 - Сопоставление блоковой структуры 3 ранга Ерунаковского геолого-эконо–мического района с дешифрированными фотоматериалами

При оконтуривании блоков не всегда удавалось придерживаться определенных высотных уровней. Иногда расположенные рядом высотные отметки рельефа разных уровней, но близкие по величине, в зависимости от общей ситуации, были отнесены к одному уровню. Это объясняется меняющимся рельефом территорий от равнин на севере до среднегорья на юге и юго-востоке. Границы между блоками проводились в основном с учетом четырех факторов: разницы высот, конфигурации горизонталей, ступеней рельефа и размещения рек, причем практически все линии разломов подчеркиваются размещением гидросети.

В результате проведенных построений и их представления в электронном виде получена карта-схема блоковых структур 2 ранга площади Ерунаковского геолого-экономического района, фрагмент которой представлен на рисунке 1.12.

Далее, контуры Ерунаковского блока 2 ранга были перенесены с карты масштаба 1:500 000 на топографическую карту 1:100 000. Геодинамическому

районированию подверглась вся площадь Ерунаковского блока. На построенной таким образом схеме показана расчлененность Колмогоровского блока блоками 3 ранга (рисунки 1.13, 1.14).

2. Определение параметров зон дезинтеграции (разрушения) горных пород на основе данных геоэлектрических измерений на шахтных полях

2.1. Разработка теоретической модели, которая связывает пространственно-геометрические характеристики области дезинтеграции горных пород с параметрами электрических полей естественной природы

2.1.1. Гипотезы формирования очаговой зоны области дезинтеграции горных пород

Достаточно полный обзор существующих на настоящее время гипотез формирования очага сейсмического события приведен Б. В. Костровым.

Как замечает Б. В. Костров, одним из первых исследователей сейсмических процессов (землетрясений), использующем понятие очага, является H. F. Reid. В указанной работе H. F. Reid рассматривает очаг как разрыв горных пород. В дальнейшем H. Benioff развил эту модель. Суть модели заключается в том, что разрушение в очаге происходит, когда напряжения в некотором объеме достигают предела прочности пород. При этом материал разрушается во всем указанном объеме, который и является очагом сейсмического события. Энергия, высвободившаяся в процессе разрушения, отождествляется с энергией землетрясения. В дальнейших исследованиях H. Benioff полагал, что суммарный объем очага основного толчка землетрясения содержит также и объемы очагов афтершоков. Анализ предложенной теории показал, что ее нельзя принять без некоторых оговорок. Суть критики заключалась в том, что поскольку в результате разрушения в очаге энергия упругой деформации уменьшается, то она должна уменьшиться и в окружающей этот очаг среде. Таким образом, за очаг должен быть принят не только тот объем, где проис-

ходят разрушения, но и весь объем, в котором высвобождается упругая энергия. K.E. Bullen попытался улучшить предложенную модель. Он предложил считать очагом тот объем, в котором перед землетрясением материал находится при напряжении, близком к пределу прочности; при этом рассматриваемый объем не больше, чем на порядок превышает объем области разрушения в очаге. Однако на практике суммарный объем очага, как указывают в своих работах M. Bath и S. Duda, все же принимается равным объему области афтершоков.

Другое направление исследований связано с открытием японскими сейсмологами закономерного распределения знаков первых вступлений сейсмических волн. В связи с этим H. Nakano в работе поставил задачу о поиске параметров точечного источника, для которого распределение знаков первых вступлений сейсмических волн совпадало бы с наблюдаемым при землетрясениях. В дальнейшем P. Byerly, J. H. Hodgson, H. Honda, В. И. Кейлис-Борок, А. В. Введенская продолжали развивать точечную теорию очага.

Таким образом, при определении очага сейсмического события подчеркивают разные стороны содержания этого понятия: очаг, как точка, определяемая по первым вступлениям сейсмических волн, либо как область необратимых деформаций, или как область, где расположены гипоцентры афтершоков. Все эти определения базируются на разрывной теории, согласно которой разрыв является очагом сейсмического события только при его быстром распространении.

Приведем формальное определение очага сейсмического события, предложенное Б. В. Костровым в работе. Очаг сейсмического события представляет собой разрыв сплошности материала Земли по некоторой, возможно, плоской площадке; разрыв возникает под действием упругих напряжений, накопленных в процессе деформации, и приводит к снятию этих напряжений на указанной площадке; разрыв возникает сначала в малой области, а затем распространяется от нее со скоростью, не превосходящей скорости продольных сейсмических волн; соответствующий очагу разрыв является

разрывом скольжения; материал Земли вне поверхности разрыва остается линейно-упругим.

Объединяя вышеприведенные варианты определений очага сейсмического события, можно ввести два следующих его определения:

1) очаг сейсмического события (очаговая зона) – это некоторая объемная область горных пород, окружающая место зарождающегося разрыва и соответствующая зоне необратимых деформаций и максимальных перепадов механических напряжений;

2) эффективный очаг сейсмического события – это объемная область горных пород, включающая собственно очаг, а также зону возможных афтершоков.

Для дальнейшего изложения представляется важным вопрос о предполагаемой форме и предельных размерах очага сейсмического события. В определении очага под разрывами (дизъюнкциями) будем понимать нарушения строения горных пород следующих видов: сброс, взброс, надвиг. Классификацию и теорию дизъюнктивных нарушений разработал D. L. Anderson. Согласно этой теории, внутри массива горных пород находится плоскость (сместитель), по которой и происходит разрыв и смещение блоков относительно друг друга. И. С. Гарбер с соавторами получили, что сместитель имеет форму эллипса, поскольку при любом разрывном нарушении должно происходить его затухание в сторону периферии разрыва. Поскольку разрыв и зона его подготовки будут занимать некоторый объем массива пород, то представляется разумным представить объемную модель очага в виде эллипсоида. Важным также является и вопрос о наклоне сместителя. Согласно надвиги в земной коре, как правило, образуются под углами к земной поверхности $23^0 < \alpha < 45^0$, а сбросы – под углами $45^0 < \alpha < 65^0$. На основе приведенных рассуждений будем считать, что очаговая зона представляет собой эллипсоид, который повернут относительно плоскости дневной поверхности на угол $\alpha = 45^0$ с наибольшей полуосью, направленной по падению к дневной поверхности, и наименьшей – вдоль перпендикуляра к линии падения.

2.1.2. Потенциал равномерно заряженного эллипсоида в трёх – и четырёхслойном однородном изотропном пространстве

Расчёт потенциала равномерно заряженного эллипсоида производится в два этапа: 1) расчёт потенциала точечного источника в трёх – и четырёхслойном однородном изотропном пространстве; 2) интегрирование по объёму эллипсоида полученного решения.

Рассмотрим задачу о потенциале точечного источника в слоистой среде. Горные породы можно подразделить на следующие четыре класса: однородные изотропные, однородные анизотропные, неоднородные изотропные и неоднородные анизотропные.

В общем случае горная порода в области горной выработки представляет собой неоднородную анизотропную среду. При этом неоднородность среды связана как с наличием пород различного вида, так и с наличием горных выработок, проведенных в нетронутой толще пород. Анизотропность присуща осадочным слоистым породам и метаморфическим породам с хорошо выраженной сланцеватостью.

В случае исследования распределения потенциала в районе горной выработки возникает необходимость учитывать вышеприведенные обстоятельства. Однако, на достаточно большом расстоянии от горной выработки влияние последней на распределение потенциала электрического поля можно пренебречь. По данным вертикального электрозондирования осадочные породы представляют собой слои с практически постоянными в пределах каждого слоя электрическими характеристиками. В связи с этим горизонтальной анизотропией горных пород с достаточной степенью точности для практики также можно пренебречь и учитывать только вертикальную анизотропность, обусловленную пространственным распределением слоев горных пород.

Общая система уравнений Максвелла в системе единиц Си имеет вид:

$$rot\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad rot\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \qquad div\vec{B} = 0, \quad div\vec{D} = \delta, \qquad (2.1)$$

где $\vec{E}$, $\vec{H}$ – соответственно векторы напряженности электрического и магнитного поля, В/м и А/м; $\vec{D}$, $\vec{B}$ – соответственно векторы электрического смещения и магнитной индукции, Кл/м^2 и Тл; $\vec{j}$ – вектор плотности токов, обусловленных перемещением электрических зарядов в рассматриваемой точке среды; δ – объемная плотность зарядов, Кл/м^3.

Предположим, что вмещающая источники тока среда изотропна. Добавим к рассмотренным четырем уравнениям еще три, характеризующие указанное свойство среды:

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}, \qquad \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}, \qquad \vec{j} = \rho^{-1}\vec{E}, \qquad (2.2)$$

где $\varepsilon\varepsilon_0$, $\mu\mu_0$ – абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемость вмещающего пространства Ф/м, Г/м; ρ –УЭС, Ом•м.

В случае стационарности рассматриваемого поля все производные по времени в уравнениях (2.1) будут равны нулю и уравнения Максвелла примут вид:

$$\begin{aligned} rot\vec{E} &= 0, & rot\vec{H} &= \vec{j}, \\ div\vec{B} &= 0, & div\vec{D} &= \delta. \end{aligned} \qquad (2.3)$$

Поскольку $div(rot\vec{H}) = 0$, то $div\vec{j} = 0$. С другой стороны, в силу $rot\vec{E} = 0$, поле $\vec{E}$ является потенциальным, а значит, выполняется равенство $\vec{E} = -grad\varphi$, где φ – потенциал поля. Подставляя полученное выражение для $\vec{E}$ в $\vec{j} = \rho^{-1}\vec{E}$ и учитывая соленоидальность поля плотности тока, получим следующую цепочку тождественных преобразований: $div(\rho^{-1}\vec{E}) = -\rho^{-1} div \cdot grad\varphi = -\rho^{-1}\nabla^2\varphi = 0$. Сокращая на $-\rho^{-1}$, получим из-

вестное уравнение Лапласа для потенциала стационарного электрического поля:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \qquad (2.4)$$

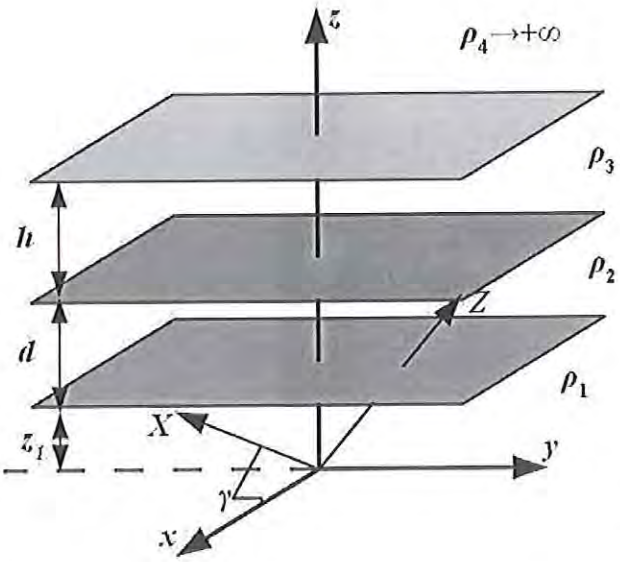


Рисунок 2.1 - К расчету потенциала точечного источника.

В качестве пространства, вмещающего очаг концентраций механических напряжений, будем рассматривать четырёхслойное и, как частный случай, трехслойное изотропное пространство с плоскопараллельными границами, что позволит непосредственно учесть эффект экранирования, порожденный верхним увлажненным слоем осадочных пород (рисунок 2.1), а также наличие одного угольного пласта с высоким удельным сопротивлением.

Рассмотрим четырехслойное однородное, изотропное пространство с плоскопараллельными границами с УЭС слоев ρ_1, ρ_2, ρ_3, $\rho_4 \to \infty$, Ом·м (нумерация слоев идет снизу вверх). Заглубленный точечный источник тока расположен на расстоянии z_1, м от границы первого и второго слоев. Мощности второго и третьего слоев равны d и h м соответственно (рисунок 2.1).

Свяжем с точечным источником тока I начало цилиндрической системы координат с осью Oy, перпендикулярной к поверхности земли и направленной вверх. Тогда потенциал точечного источника в каждом слое должен удовлетворять уравнению Лапласа (2.5), граничным и предельным условиям (2.6):

$$\nabla^2 \varphi_i = \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial z^2} = 0, \qquad (2.5)$$

$$(\varphi_1)_{y=y_1} = (\varphi_2)_{y=y_1},\ (\varphi_2)_{y=y_1+d} = (\varphi_3)_{y=y_1+d},\ (\varphi_3)_{y=y_1+h+d} = (\varphi_4)_{y=y_1+h+d},$$

$$\frac{\partial\varphi_1}{\rho_1\partial z}_{z=z_1} = \frac{\partial\varphi_2}{\rho_2\partial z}_{z=z_1},\ \frac{\partial\varphi_2}{\rho_2\partial z}_{z=z_1+d} = \frac{\partial\varphi_3}{\rho_3\partial z}_{z=z_1+d},\ \frac{\partial\varphi_3}{\rho_3\partial z}_{z=z_1+d+h} = \frac{\partial\varphi_4}{\rho_4\partial z}_{z=z_1+d+h}, \qquad (2.6)$$

$$(\varphi_{2,3,4})_{R\to 0} \to 0,\ (\varphi_1)_{R\to 0} \to \frac{\rho_1 I}{4\pi R},\ R^2 = r^2 + z^2.$$

Решение данной задачи для третьего слоя было указано в работах:

$$\varphi_4 = \frac{\rho_3 \cdot I}{2\pi}\int_0^\infty A(m)J_0(mr)\exp(-mz)dm, \qquad (2.7)$$

где $A(m) = \dfrac{(1-K_1)\cdot(1-K_2)}{1+K_1\cdot K_2\cdot q + K_1\cdot q\cdot s + K_2\cdot s}$; $q = \exp(-2md)$, $s = \exp(-2mh)$, I – величина тока точечного источника, A; ρ_i – УЭС i-го слоя, Ом·м; $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ – полярный радиус, м; h, d – мощности промежуточных слоев, м; φ_4 – величина потенциала в четвертом слое, В; $K_i = (\rho_{i+1} - \rho_i)\cdot(\rho_{i+1} + \rho_i)^{-1}$ – коэффициенты отражения границ между i-м и i+1-м слоями.

Для вычисления потенциала равномерно заряженного эллипсоида проинтегрируем (2.7) по объему эллипсоида.

$$\varphi_4 = \frac{\rho_3 div\ \vec{j}}{2\pi}\iiint_{V_p}\left[\int_0^\infty A(m)J_0(mr)\exp(-mz)dm\right]dV_p, \qquad (2.8)$$

где $dV_p = dx_p dy_p dz_p$ – элементарный объем, x_p, y_p, z_p – координаты точки P внутри очаговой зоны, по которым ведется интегрирование, м; x_M, y_M, z_M – координаты точки измерения потенциала M вне объема эллипсоида, м; $r = \sqrt{(x_M - x_p)^2 + (y_M - y_p)^2}$ – радиальное расстояние от точки M

до точки P, м; $z = z_M - z_p$, м; V_p – эллипсоид с центром в начале координат; $div\vec{j}$ – объемная плотность токов в очаге разрушения, А /м^3.

В случае трёхслойного пространства выражение (2.7) естественным образом преобразуется в выражение:

$$\varphi_3 = \frac{\rho_2 \cdot I}{2\pi}\int_0^{\infty} A(m)J_0(mr)\exp(-mz)dm, \qquad (2.9)$$

где $A(m) = \dfrac{(1-K_1)}{1+K_1 \cdot q}$; $q = \exp(-2m[d+h])$.

Выражение (2.9) является более удобным для численной реализации, поэтому будем использовать его для качественного анализа распределения потенциала на земной поверхности.

После аппроксимации подынтегрального выражения и вычисления тройного и несобственного интегралов получим выражение:

$$\varphi_3 = \rho_2(1-K_1)h^2 div\vec{j}\sum_{n=0}^{N} p(n)\begin{bmatrix} M_{000} - (A_M)^2 M_{100} - \\ -(B_M)^2 M_{010} - \bar{y}_M^2 M_{001} \end{bmatrix}, \qquad (2.10)$$

где $A_M = \bar{x}_M \cos\alpha + (\bar{z}_M + 2n)\sin\alpha$, $B_M = -\bar{x}_M \sin\alpha + (\bar{z}_M + 2n)\cos\alpha$; α – угол наклона эллипсоида; M_{000}, M_{100}, M_{010}, M_{001} – эллиптические интегралы вида

$$M_{000} = \frac{ABC}{2}\int_{\xi}^{\infty}\frac{du}{Q(u)},\ M_{100} = \frac{ABC}{2}\int_{\xi}^{\infty}\frac{du}{(A^2+u)Q(u)},$$

$$M_{010} = \frac{ABC}{2}\int_{\xi}^{\infty}\frac{du}{(B^2+u)Q(u)},\ M_{001} = \frac{ABC}{2}\int_{\xi}^{\infty}\frac{du}{(C^2+u)Q(u)},$$

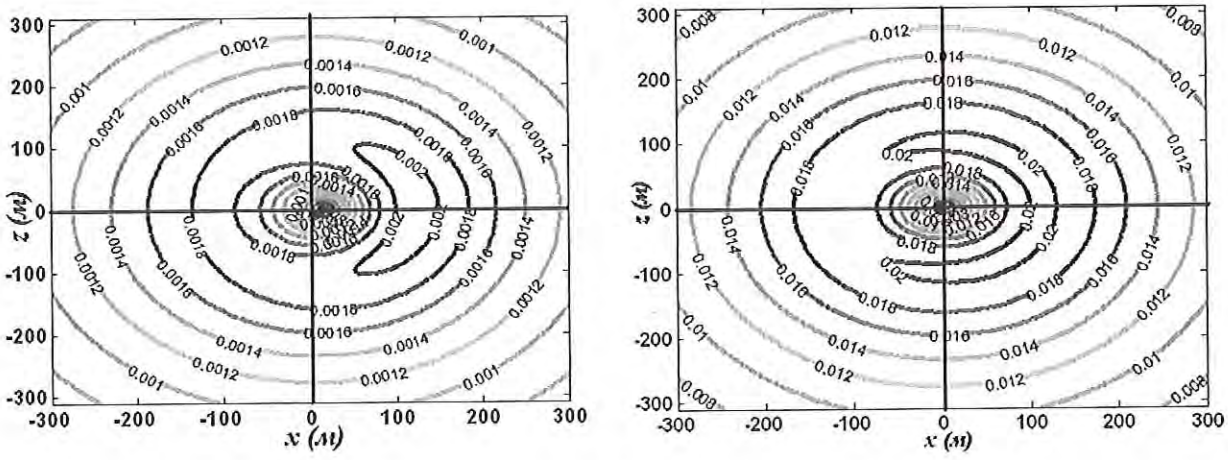
ξ – наибольший положительный корень уравнения $\dfrac{(x_M)^2}{A^2+\xi} + \dfrac{(z_M)^2}{B^2+\xi} + \dfrac{(y_M)^2}{C^2+\xi} = 1$,

$Q(u) = \sqrt{(A^2+u)(B^2+u)(C^2+u)}$; $\bar{x}_M$, $\bar{z}_M$ – безразмерные координаты следующего вида: $x_M / h = \bar{x}_M$, $z_M / h = \bar{z}_M$; $p(n)$ – коэффициенты аппроксимирующего многочлена по алгоритму Ремеза.

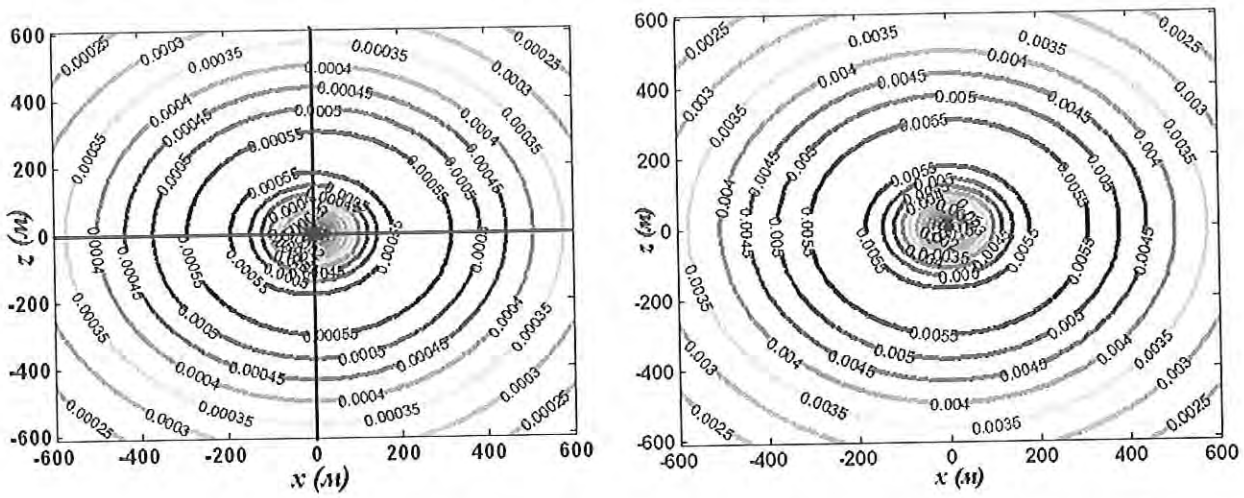
При определении напряженности электрического поля необходимо воспользоваться формулой: $\vec{E} = -grad\varphi$. Дифференцируя (2.10) по координатам x_M, y_M, z_M, получим выражения

$$(E_3)^{x_M} = 2\rho_2 h div \vec{j}(1-K_1)\sum_{n=0}^{N} p(n)\left(A_M \cos\alpha M_{100} - B_M \sin\alpha M_{010}\right),$$
$$(E_3)^{z_M} = 2\rho_2 h div \vec{j}(1-K_1)\sum_{n=0}^{N} p(n)\left(A_M \sin\alpha M_{100} + B_M \cos\alpha M_{010}\right). \qquad (2.11)$$

В качестве иллюстрации приведем изолинии горизонтальной компоненты напряженности поля E_{xz} для рассмотренного выше эллипсоида и вмещающего пространства (рисунок 2.2).



$A = 90$, $B = 10, 80$, $C = 10$, $H = 150$, $h = 50$, м, $\alpha = 45^0$, $K_{12} = -0{,}6$.



$A=90$, $B=10,80$, $C=10$, $H=300$, $h=50$, м, $\alpha=45^0$, $K_{12}=-0{,}6$.

Рисунок 2.2 - Изолинии безразмерной напряженности поля $E_{xz}=\sqrt{E_x^2+E_z^2}$ на земной поверхности.

В случае четырёх и более слоёв предложенная методика расчёта применима плохо, поскольку выражение $A(m)$ из (2.7) плохо аппроксимируется многочленом. Поэтому для расчётов применялись непосредственные квадратурные формулы Гаусса для отрезка и параллелограмма, в который преобразовывался расчётный эллипсоид с помощью следующих замен координат:

$$x = X\cos\gamma - Z\sin\gamma,\ y = Y,\ z = X\sin\gamma + Z\cos\gamma,$$

и

$$X = x\cos\gamma + z\sin\gamma,\ Y = y,\ Z = -x\sin\gamma + z\cos\gamma, \qquad (2.12)$$

которая производит поворот системы координат так, чтобы они проходили через главные оси эллипсоида, и

$$Xp = r\cos\alpha\cos\beta,\ Zp = Cr\sin\beta,\ Yp = Br\sin\alpha\cdot\cos\beta,$$

$$|J| = BCr^2\cos\beta, \qquad (2.13)$$

где $\alpha\in[0;2\pi]$, $\beta\in[-\pi/2;\pi/2]$, $r\in[0;1]$, которая преобразовывает эллипсоид в параллелепипед; xm, ym, zm, Xm, Ym, Zm и xp, yp, zp, Xp, Yp, Zp –

координаты точек измерения и точек эллипсоида в старой и новой системе координат соответственно; $r = [(xm - xp)^2 + (ym - yp)^2]^{1/2} =$

$= [Am + (Ym - Yp)^2]^{1/2}$, $Am = XX\cos^2\gamma - XZ\sin(2\gamma) + ZZ\sin^2\gamma$,

$XX = (Xm - Xp)^2$, $ZZ = (Zm - Zp)^2$, $XZ = (Xm - Xp)\cdot(Zm - Zp)$,

$zm - zp = (Xm - Xp)\sin\gamma + (Zm - Zp)\cos\gamma$.

Для иллюстрации приведём графики размерного потенциала ЕЭП для трёх- и четырёхслойного пространства при условии, что $A = 100{,}0$; $B = 50{,}0$; $C = 10{,}0$; $h = 50{,}0$; $d = 1{,}0$; $z_1 = 120{,}0$ м; $K_1 = \{0{,}6;\ 0{,}818;\ 0{,}980\}$; $K_2 = -0{,}998$; $\gamma = 45^0$; $\nabla P_{cp} = 5\cdot 10^6$ Па/м. Результаты расчетов приведены на рисунках 2.3, 2.4.

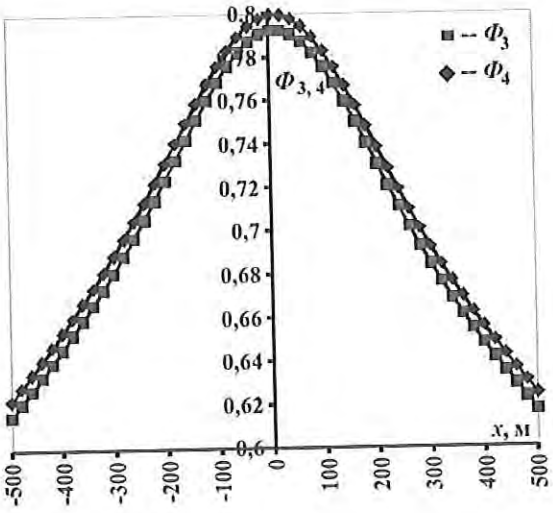


Рисунок 2.3 - Значения потенциала ЕЭП $\Phi_{3,4}$, мВ для $K_1 = 0{,}6$; $K_2 = -0{,}998$.

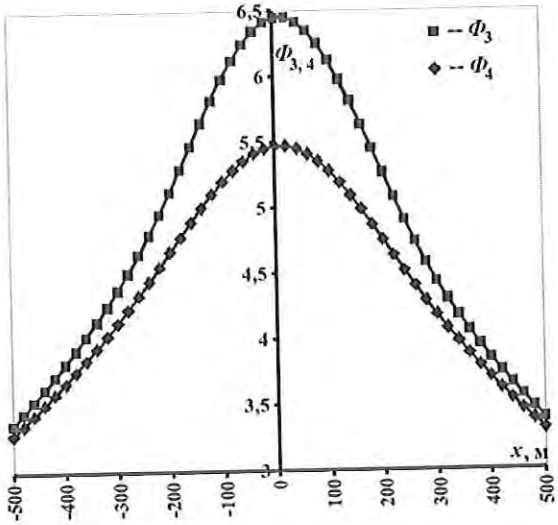


Рисунок 2.4 - Значения потенциала ЕЭП $\Phi_{3,4}$, мВ для $K_1 = 0{,}98$; $K_2 = -0{,}998$.

На основании приведенных рисунков можно сделать следующие выводы:

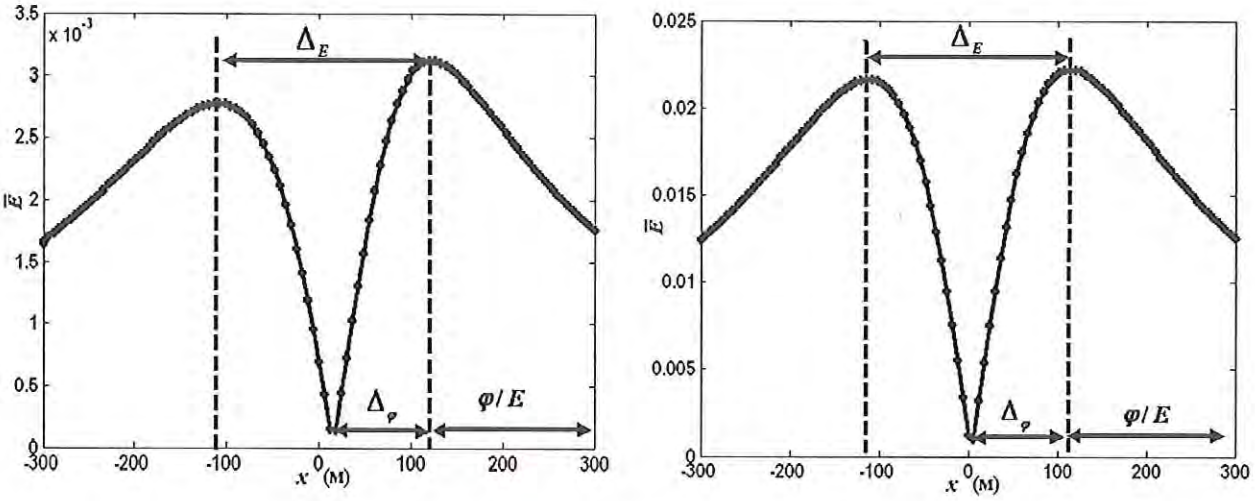
1) значение величины потенциала φ для четырёхслойного пространства превосходит аналогичное значение потенциала для трехслойного пространства при $K_1 \in [0{,}0;\ 0{,}9]$, а для $K_1 \in [0{,}9;\ 1{,}0]$ наоборот. Найдем для этих интер-

валов соотношения между УЭС слоев: $\rho_1 = [0{,}05 \cdot \rho_2; \rho_2]$ и $\rho_1 = [0{,}0; 0{,}05 \cdot \rho_2]$;

2) Влияние угольного пласта мощностью 1 метр пренебрежимо мало для соотношения УЭС из первого случая и поэтому применять более сложную модель нет необходимости. Если же соотношение УЭС слоев из второго случая, то угольный слой мощностью уже 1 метр существенно влияет на значение потенциала φ, при этом использование более простой трехслойной модели приведет к завышенным значениям потенциала.

2.1.3. Оценка основных геометрических параметров очаговой зоны

Данный параграф посвящен решению следующих двух проблем: определение глубины залегания и величины линейных размеров очаговой зоны концентраций механических напряжений.



$A = 90$; $B = 10,80$; $C = 10$; $H = 150$; $h = 50$; м, $\alpha = 45^0$, $K_{12} = -0{,}6$.

Рисунок 2.4 - Графики напряженности ЭП на земной поверхности.

Приведем, используя результаты предыдущей главы, графики напряженности ЕЭП на земной поверхности, вычисленной на продольной оси симметрии $y_M = 0$ (рисунок 2.4.).

Анализ приведенного рисунка позволяет ввести в рассмотрение следующие три геометрические характеристики электрического поля: Δ_E – расстояние между максимумами напряженности ЭП, м; Δ_φ – расстояние между максимумами напряженности и потенциала ЭП, м; φ / E – числовая характеристика с размерностью «м».

В случае эллипсоидального очага, расположенного в трехслойном пространстве, величина Δ_E будет зависеть от общей глубины залегания очага $H = y_M$, от мощности промежуточного слоя h и коэффициентов отражения K_1, K_2. Обобщая известную формулу для шарообразного источника тока, можно предположить, что зависимость, связывающая глубину залегания очага и расстояние между максимумами напряженности ЕЭП, имеет линейный вид:

$$H = k \cdot \Delta_E + m, \tag{2.14}$$

где k и m зависят от K_{12} и h.

Для определения линейных размеров очаговой зоны будем использовать существенную зависимость между полудиаметром эллипсоидального очага A и расстоянием между максимумами потенциала и напряженности поля: Δ_φ. Как показали многочисленные расчеты при частных значениях h, K_1, K_2, z_1, наиболее точно зависимость $\Delta_\varphi = f(A)$ можно описать уравнением вида:

$$A = b \cdot \sqrt{a - \Delta_\varphi}, \tag{2.15}$$

где коэффициенты a и b зависят от h, K_1, K_2, z_1.

2.2. Разработка теоретической модели, связывающей величину перепадов механических напряжений и характеристик порождённых электрических полей

Концентрации и перепады механических напряжений связаны в первую очередь именно с разрушениями пород при ведении горных работ, поэтому представляется важным установить взаимосвязь между естественным электрическим полем и возникающими механическими напряжениями.

Рассмотрим механизм взаимосвязи ЕЭП и механических напряжений, который получил название диффузионного, более подробно.. При термодинамическом равновесии и отсутствии градиентов концентрации точечных дефектов диффузия дефектов является хаотичной, и электрический ток не возникает. При появлении градиентов механических напряжений данное равновесное состояние нарушается, и возникает направленный поток точечных дефектов, причем вакансии диффундируют в область максимального, а междоузельные ионы – в область минимального давления. При различии коэффициентов диффузии катионных и анионных вакансий возникает результирующий «сторонний» ток, а так же встречный ток проводимости, стремящийся скомпенсировать возникающее электрическое поле. При установлении динамического равновесия полный ток из объема, занимаемого дефектами, будет равен нулю, однако в данной области возникает стационарный заряд, который создает электрическое поле в окружающей среде.

Получена общая формула для возникающего электрического поля, в предположении, что в кристалле существует лишь один тип носителей заряда – катионные вакансии, концентрации которых намного выше концентраций анионных:

$$\vec{E} = \frac{\Omega \nabla P}{3q}. \qquad (2.16)$$

Таким образом, электрическое поле зависит только от величины градиента давления, механической дилатации решетки при возникновении катионной вакансии и заряда вакансии. Поскольку величина $\Omega \cdot q^{-1}$ не зависит от

пространственных координат, то для потенциала поля в каждой точке кристалла получаем следующее выражение:

$$\varphi = \frac{|\Omega| P}{3|q|}. \qquad (2.17)$$

Из (2.17) следует, что потенциал поля пропорционален среднему давлению $P_{kk}/3$ в каждой точке механической неоднородности, при этом знак его зависит от сжатия $P_{kk} < 0$ и растяжения $P_{kk} > 0$ неоднородности, поскольку при сжатии в области максимального давления скапливаются катионные вакансии, имеющие отрицательный заряд, при растяжении же катионные вакансии «выталкиваются» из области максимального давления.

Таким образом, Б. Г. Тарасову с соавторами удалось теоретически доказать полученный ранее экспериментально факт зависимости потенциала поля от первого инварианта тензора геомеханических напряжений.

Развивая данное направление, Д. В. Алексеев произвел более строгое и детальное рассмотрение данной задачи на основе учета носителей зарядов двух знаков в рамках линейной теории диффузии. Такое рассмотрение позволяет существенно расширить исходную задачу: учесть распределение основных дефектов по Schottky и Френкелю; установить взаимосвязь потенциала с изменяющимся во времени давлением (ниже будет рассмотрено синхронное периодическое и экспоненциальное изменение давления); оценить плотность тока, распределенного в вершине плоской трещины.

Рассмотрим нестационарную диффузию точечных дефектов структуры в безграничном кристалле при следующих условиях на бесконечности: отсутствие тока и направленной диффузии дефектов при отсутствии поля механических напряжений.

Система уравнений, описывающих нестационарную диффузию точечных дефектов, будет состоять из уравнения непрерывности, уравнения амбиполярной диффузии и уравнения Пуассона для потенциала.

$$\frac{\partial n^{\pm}}{\partial t} = -div\,\vec{i}_{\pm}, \tag{2.18}$$

$$\vec{i}_{\pm} = \pm\frac{qn^{\pm}D^{\pm}}{kT}\vec{E} - D^{\pm}\nabla n^{\pm} - \frac{D^{\pm}n^{\pm}\Omega^{\pm}\nabla P}{3kT}, \tag{2.19}$$

$$div\,\vec{E} = \frac{q(n^{+} - n^{-})}{\varepsilon\varepsilon_0}, \tag{2.20}$$

где q – заряд точечных дефектов (катионных и анионных вакансий), Кл; $n^{\pm}, \Omega^{\pm}$ – соответственно концентрация и дилатация для каждого типа носителей, м$^{-3}$, м^3; $D^{\pm}$ – коэффициент самодиффузии дефектов положительного и отрицательного знака, м^2/с; $\vec{E}$ – напряженность поля проводимости, В/м; $P_{kk}/3$ – среднее давление в каждой точке кристалла, Па; $\varepsilon\varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость кристалла, Ф/м; $\vec{i}_{\pm}$ – вектор потока точечных дефектов положительного и отрицательного знаков.

Решив данную систему (2.18 – 2.20) относительно переменной $\delta N = n^{+} - n^{-}$, можно будет определить напряженность электрического поля из уравнения (2.20).

Приведём уже найденное решение для двух типов точечных дефектов: Schottky и Френкеля, при этом будем рассматривать следующие зависимости изменения перепадом механических напряжений во времени: периодическое и экспоненциальное, так как при постоянном давлении решение будет совпадать с выражением (2.16) для дефектов по Френкелю, в случае же дефектов по Schottky необходимая зависимость отсутствует.

Зависимость между напряжением, которое изменяется по периодическому закону $P\cos(f \cdot t)$, где f 1/с – частота изменения напряжения, и по-

тенциалом ЕЭП при $D^+ \approx D^-$ в случае дефектов по Schottky отсутствует, а для дефектов по Френкелю определяется соотношением:

$$\varphi = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \left[A_2 \cos(f \cdot t) + f \sin(f \cdot t)\right] \cdot \frac{A_3}{f^2 + A_2^2} \cdot P, \qquad (2.21)$$

при $D^+ >> D^-$, $D^+ << D^-$ и дефектах по Schottky определяется по формуле [ ]

$$\varphi = \mp\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \left[A_2 \cos(f \cdot t) + f \sin(f \cdot t)\right] \cdot \frac{A_3}{A_2^2 - f^2} \cdot P, \qquad (2.22)$$

а для дефектов по Френкелю согласно [ ]

$$\varphi = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{A_2\ A_3}{A_2^2 - f^2} \cdot \cos(f \cdot t) \cdot P. \qquad (2.23)$$

Зависимость между давлением, которое изменяется по экспоненциальному закону $P = P \cdot \exp(-\lambda t)$, где сомножитель λ, 1/с характеризует скорость затухания напряжения, и потенциалом ЕЭП при $D^+ \approx D^-$ в случае дефектов по Schottky отсутствует, а для дефектов по Френкелю определяется соотношением:

$$\varphi = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{A_3 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)}{\lambda - A_2} \cdot P, \qquad (2.24)$$

при $D^+ >> D^-$, $D^+ << D^-$ и дефектах по Schottky и Френкелю определяется по одной и той же формуле [ ]

$$\varphi = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{A_3 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)}{\lambda - A_2} \cdot P, \qquad (2.25)$$

где $A_2 = 2/(\rho\varepsilon\varepsilon_0)$, $A_3 = 2\Omega/(\rho\, q^2)$, q – заряд точечных дефектов (катионных и анионных вакансий), Кл; $n^{\pm}, \Omega^{\pm}$ – соответственно концентрация и дилатация для каждого типа носителей, м$^{-3}$, м^3; $D^{\pm}$ – коэффициент самодиффузии дефектов положительного и отрицательного знака, м^2/с; $\vec{E}$ – напряженность поля проводимости, В/м; P – среднее давление в каждой точке кри-

сталла, Па; $\varepsilon\varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость кристалла, Ф/м; $\vec{i}_{\pm}$ – вектор потока точечных дефектов положительного и отрицательного знаков.

Определим теперь выражение для размерного коэффициента в формуле (2.10). Предварительно вычислим объемную плотность тока $div\,\vec{j}$. Используя формулу (2.16) и соотношение Эйнштейна, получим следующую формулу для величины $\vec{j}$:

$$\vec{j} = \Omega \nabla P / \rho q, \tag{2.28}$$

где Ω – дилатация кристаллической решетки основных породообразующих минералов при возникновении катионной вакансии, м^3; $P_{cp} = (P_{11} + P_{22} + P_{33})/3$ – среднее напряжение в зоне концентраций, Па; q – заряд вакансии, Кл; ρ – УЭС горной породы, Ом•м.

Из системы уравнений Максвелла получим, что

$$div\,\vec{j} = \frac{\delta}{\varepsilon\varepsilon_0 \rho}. \tag{2.29}$$

Из серии формул (2.23 – 2.27) получим, что $\vec{E} = K \cdot \nabla P$. Предполагая, что в выбранном объеме $div\,\vec{j} = const$, $\vec{E} = const$, а сам объем имеет форму шара радиуса A, получим: $\int_V div\,\vec{j}\,dV = \frac{4}{3}\pi A^3 div\,\vec{j}$ и $\oint_S (\vec{j} \cdot \vec{n}) dS = \frac{4E\pi A^2}{\rho_1} = \frac{4K}{\rho_1} \nabla P \pi A^2$.

Откуда получаем формулу для $div\,\vec{j}$:

$$div\,\vec{j} = \frac{3K}{A\rho_1} \nabla P, \tag{2.30}$$

где A – радиус шарообразного очага, м; К – константа из формул (2.23 – 2.27); ρ_1 – УЭС первого слоя, Ом•м.

Если предположить, что очаг имеет форму вытянутого эллипсоида, для которого выполняются соотношения $A > B = C$, то площадь его поверхности и объем очага, используемые в интегралах по поверхности и объему очага, будут определяться по формулам: $P = 2\pi C\left(C + \dfrac{A^2 \arcsin\dfrac{\sqrt{A^2 - C^2}}{A}}{\sqrt{A^2 - C^2}}\right)$ и $V = \dfrac{4}{3}\pi A C^2$. В этом случае объемная плотность токов будет определяться по формуле:

$$div\,\vec{j} = \frac{3K}{2\rho_1 AC}\left(C + \frac{A^2 \arcsin\dfrac{\sqrt{A^2 - C^2}}{A}}{\sqrt{A^2 - C^2}}\right)\nabla P. \qquad (2.31)$$

Приведем два примера применения предложенных зависимостей.

Используем результаты измерений потенциала ЕЭП, произведенных В. В. Дырдиным, Г. В. Алексеевской и А. И. Шикановым по профилю, проложенному на земной поверхности над серединой лавы 17124 шахты имени Кирова при отработке пласта Бреевского в 1988 году. Приведем выкопировку с плана горных работ лавы 17124 в районе диагональной печи №1 и графики величины потенциала ЕЭП, измеренного на земной поверхности по профилю, проложенному над серединой лавы (рисунки 2.5, 2.6).

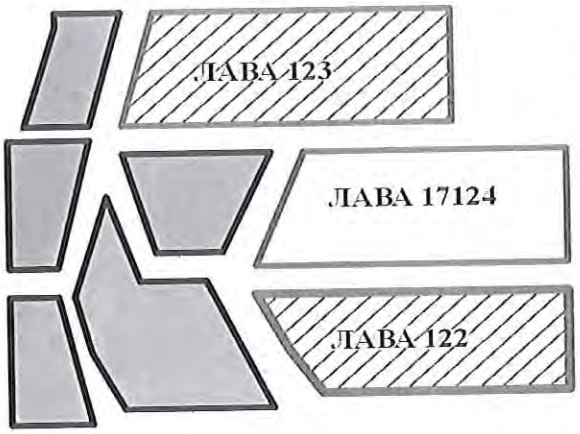


Рисунок 2.5 - Выкопировка плана горных работ на шахте им. Кирова

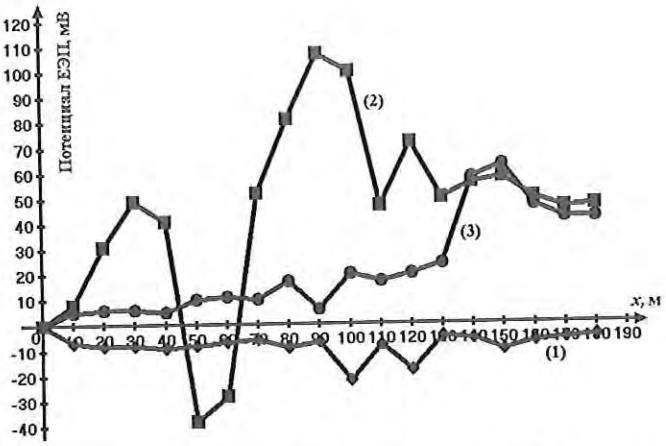


Рисунок 2.6 - График значений потенциала на земной поверхности

На рисунке 2.6 приведены три графика значений потенциала, измеренных соответственно 14, 15, 16.09.1988. Положение очистного забоя в эти дни было соответственно в точках с координатами $x = 50, 55, 60$ м.

Можно отметить качественное соответствие теоретических положений представленным экспериментальным данным. А именно, на втором графике наблюдаются два ярко выраженных максимума потенциала впереди и позади очистного забоя, что соответствует образованию двух очаговых зон концентраций механических напряжений. Расстояние между ними порядка 90 метров. После подвигания забоя 15.09.1988 произошло обрушение кровли, что привело к уменьшению механических напряжений в призабойной зоне – произошло уменьшение величины потенциала ЕЭП и сдвиг его максимума вглубь пласта.

Во втором примере рассмотрим карту изолиний потенциала, измеренного А.И. Шикановым и Г. В. Алексеевской на шахте «Распадская» в июле 1990 года (рисунок 2.7).

Наибольшая концентрация изолиний наблюдается над границей между выработанным пространством и целиком. Величина потенциала, обусловленного перепадами механических напряжений, составляет $\varphi = 20$ мВ или

0,02 В. Полагая, что изолиния в 10 мВ расположена в зоне концентрации изолиний, получим величину $\Delta_E \approx 300$ м.

Определим глубину залегания очага в случае двух значений $K_{12} = -0{,}6$ и $K_{12} = -0{,}9$, а также двух значений $h = 10$ м и $h = 25$ м.

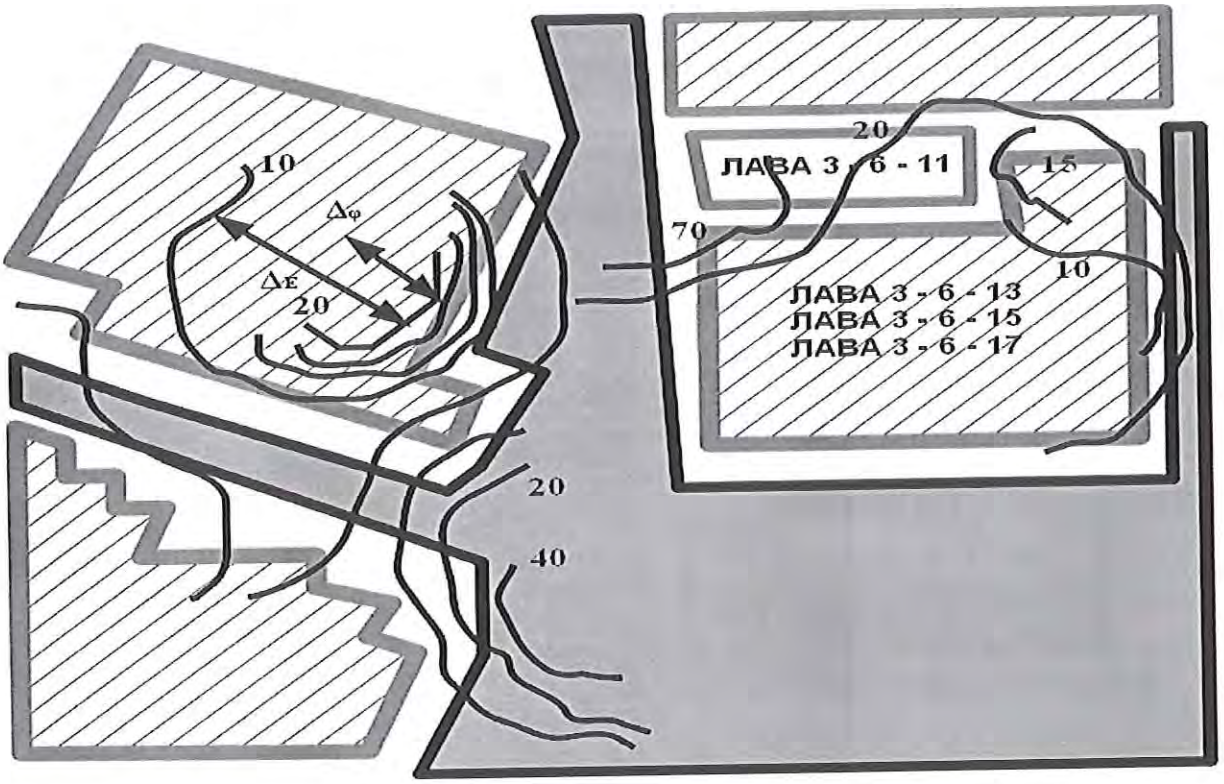


Рисунок 2.7 - Карта изолиний на земной поверхности после начала отработки лавы 3-6-11.

Если $h = 10$, то при $K_{12} = -0{,}6$ получим что $H \approx 0{,}683 \cdot 300 - 8{,}106 = 197$, м, а при $K_{12} = -0{,}9$ – $H \approx 0{,}604 \cdot 300 - 14{,}867 = 166$, м. Если же $h = 25$, то при $K_{12} = -0{,}6$ получим что $H \approx 0{,}653 \cdot 300 - 5{,}649 = 190$, м, а при $K_{12} = -0{,}9$ – $H \approx 0{,}542 \cdot 300 - 4{,}251 = 158$, м.

Г. В. Алексеевская указывает, что очистные работы производились на глубине $H = 170$ м, что попадает в полученные интервалы.

Учитывая истинную глубину залегания $H = 170$ м и среднее значение $K_{12} = -0{,}75$, определим возможные размеры очага при $h = 10$ и 25 м. По карте

изолиний определим расстояние $\Delta_\varphi \approx 130$ м. Величину A определим следующим образом: $A = 30{,}345 \cdot (144{,}401 - 130{,}0)^{1/2} \approx 115{,}0$, м. Расстояние l от области концентраций изолиний до границы очага составит: $l = 143{,}909 - 0{,}6912 \cdot A \approx 143{,}909 - 0{,}691 \cdot 115{,}0 \approx 64{,}0$, м. Величина перепадов механических напряжений, составит:

$$\nabla P = \frac{0{,}02 \cdot 10^{10} \cdot 115{,}0 \cdot 11{,}5}{1{,}5 \cdot 625{,}0 \cdot 0{,}25 \cdot 181{,}474331 \cdot 1{,}074604} \approx 5{,}8 \cdot 10^6, \text{ Па/м.}$$

В работах Б. Г. Тарасова с соавторами показано, что критическое значение перепадов механических напряжений ∇P для возникновения удароопасной ситуации составляет 10 МПа/м. Расчетное значение $\nabla P \approx 5{,}8$ МПа/м меньше критического, следовательно, опасности возникновения горного удара нет.

Произведем сравнительный анализ значений перепадов механических напряжений ∇P со значением ∇P, вычисленным по формуле, предложенной Б. Г. Тарасовым, В. В. Дырдиным, В.В. Ивановым и В. И. Мурашовым:

$$P = \gamma H \left[1 + \frac{2{,}45 \cdot (m/2l)^{0{,}12} - 1)}{l - x_0} x \right], \qquad (2.32)$$

где γ – удельный вес пород, Н/м^3; H – глубина, м; l – расстояние до максимума потенциала, м; m – мощность пласта, м; x_0 – протяженность зоны отжима, м.

Возьмем типичные значения указанных величин: $H \approx 170{,}0$ м – глубина залегания пласта; $m \approx 3{,}7$ м; $l - x_0 \approx 1{,}756$ м, где l – расстояние от кромки пласта до точки максимума потенциала, $x_0 \approx 0{,}244$ – протяженность зоны отжима м; $\gamma \approx 0{,}036$ МПа/м – объемный вес горной породы. В работе авторов произведены измерения потенциала в серии точек, разнесенных на одинаковое расстояние – 0,25 м. По формуле (2.32.) получены следующие значения: $P_2 \approx 14{,}88$, МПа, $P_1 \approx 13{,}65$, МПа. Тогда величина перепадов составит вели-

чину $\nabla P \approx 4{,}9$ МПа/м, что в пределах порядка совпадает с расчетным значением $\nabla P \approx 5{,}8$ МПа/м.

Произведём расчёт потенциала и напряжённости ЕЭП на стадии сильного микротрещинообразования. Отличие от вышеприведённого расчёта будет в величине размерного коэффициента.

В. В. Ивановым получены формулы для объемной плотности токов (А/м^3):

$$div \vec{j} = \frac{2\pi}{\rho_1 \varepsilon_0 \varepsilon_1} LQn'\tau_p, \qquad (2.33)$$

где L – линейный размер образующихся микротрещин, м; n' – скорость микротрещинообразования в очаге, м$^{-3}$•с$^{-1}$; τ_p – время релаксации зарядов в вершине трещины, с); Q – линейная плотность заряда на единицу длины фронта трещины, Кл/м; $\varepsilon_0 \varepsilon_1$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость горных пород в слое 1, Ф/м; ρ_1 – УЭС пород 1 слоя Ом•м.

Рассмотрим конечную стадию микротрещинообразования. Число накопленных к моменту землетрясения микротрещин в единице объема может быть определено из концентрационного критерия разрушения:

$$n^{-1/3} \times L^{-1} \approx 3, \text{ откуда}$$

$$n \approx 0{,}037 L^{-3}, \qquad (2.34)$$

где n – критическая концентрация микротрещин в очаге, 1/м^3.

Средняя скорость микротрещинообразования может быть определена по формуле $n' = n \cdot \tau^{-1}$, где τ – долговечность материала под нагрузкой, которая определяется из кинетического уравнения С. Н. Журкова (2).

Напомним, что исследования школы С.Н. Журкова показали, что долговечность многих материалов (металлов, кристаллов, полимеров и др.) определяется по формуле

$$\tau = \tau_0 * \exp(\beta) * \exp(-\alpha \cdot \sigma), \qquad (2.35)$$

где $\alpha = \gamma * (k\,T)^{-1}$, $\beta = U_0 * (k\,T)^{-1}$, $\tau_0 \approx 10^{-13}$ – период тепловых атомных колебаний около положения равновесия, с; γ – активационный объем, м^3; U_0 – энергия активации разрушения, Дж; k – постоянная Больцмана, Дж/^{0}К; T – абсолютная температура пород, ^{0}К; σ – среднее внешнее напряжение на образец, Па.

Дальнейшие исследования показали, что формула (2.35) не является универсальной. Например, для эластомеров более пригодной будет закономерность вида

$$\tau = \tau_0 * \exp(\beta) * \left(\frac{\sigma}{E}\right)^{-\alpha \bullet E}, \qquad (2.36)$$

где E – «подгоночная» величина, которая в работе [21] имеет смысл модуля упругости, Па.

Для полимеров и отожжённых металлов [22, 23] зависимость долговечности от нагрузки имеет слегка другой вид

$$\tau = \tau_0 * \exp(\beta) * \left(\frac{\sigma}{\sigma_p}\right)^{-n}, \qquad (2.37)$$

где σ_p – размерная «подгоночная» постоянная неясной физической природы, Па; величина $n \sim n\,(U_0, k, T)$.

Для проверки адекватности представленных моделей исследовалась зависимость числа импульсов N от величины напряжения σ в случае зависимости (2.35) получаем выражение [24]

$$N(\sigma) = \frac{N^*}{\tau_0 \cdot \sigma^l} * \exp(-\beta) * \frac{\exp(\alpha \cdot \sigma) - 1}{\alpha}, \qquad (2.38)$$

а в случае зависимости (28) получим выражение

$$N(\sigma) = \frac{N^* \cdot E}{\tau_0 \cdot \sigma^l} * \exp(-\beta) * \frac{(\sigma / E)^{\alpha \bullet E + 1}}{\alpha \cdot E + 1}. \qquad (2.39)$$

Исследования показали, что применение формулы (29) к анализу процесса накопления трещин в образцах горных пород (известняк, кварцевый диорит, роговик) приводит к отрицательным значениям величины α, при

формально большом (не меньше 0,9) индексе детерминации R^2. Применение формулы (30) к анализу тем же образцов горных пород приводит также к отрицательным значениям величины α, однако абсолютное значение этой величины будут уже много ближе к нулю, чем в первом случае. Индекс детерминации и в этом случае будет достаточно большим, а для некоторых образцов даже выше, чем в случае формулы (29). Дальнейшие исследования привели к модифицированной формулам (27, 30) следующего вида

$$\tau = \tau_0 * \exp(\beta) * \left(\frac{\sigma}{E}\right)^{1-\alpha \bullet E}, \qquad (2.40)$$

и

$$N(\sigma) = \frac{N^*}{\tau_0 \cdot \sigma^l} * \exp(-\beta) * \frac{(\sigma / E)^{\alpha \bullet E}}{\alpha}. \qquad (2.41)$$

Применение формулы (32) к анализу тем же образцов горных пород приводит уже к положительным значениям величины α при достаточно большом значении индекса детерминации, но несколько меньшем, чем в первых двух случаях.

Произведём анализ применимости формул (2.39, 2.40, 2.41) для композиционных материалов и горных пород.

Кривые накопления трещин представлены на рисунках 2.8 – 13. [25, 26].

Неизвестные параметры α и β в зависимостях (2.39, 2.40, 2.41) будем искать с помощью метода наименьших квадратов, численная реализация которого с помощью эволюционных алгоритмов заложена в надстройке NLPSolver свободного табличного процессора OO Calc.. Результаты расчётов приведены в следующей таблице 2.1.

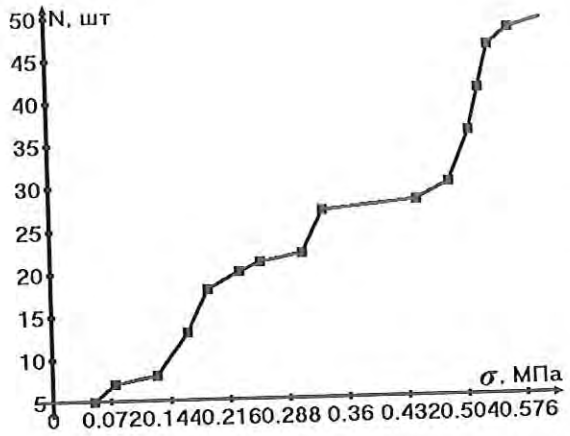


Рисунок 2.8 - Известняк

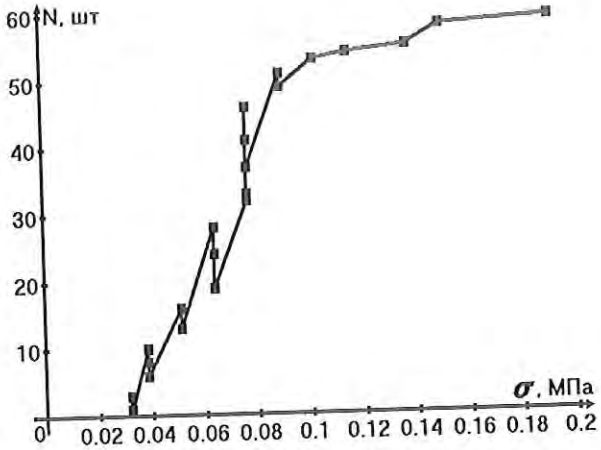


Рисунок 2.9 - Роговик

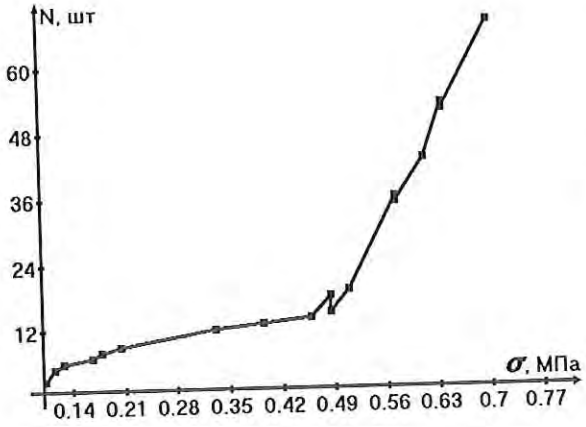


Рисунок 2.10 - Кварцевый диорит

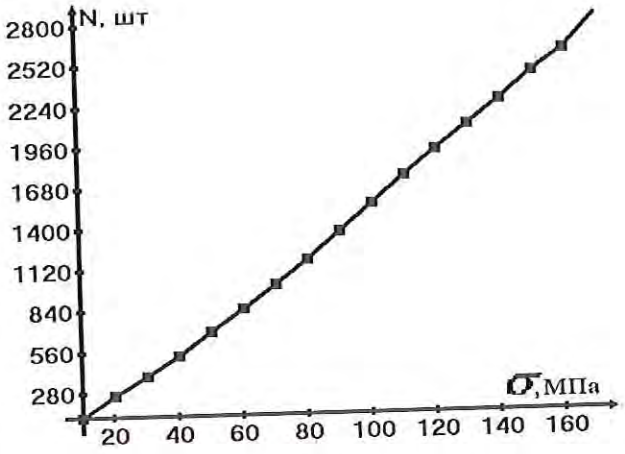


Рисунок 2.11 - Фенопласт

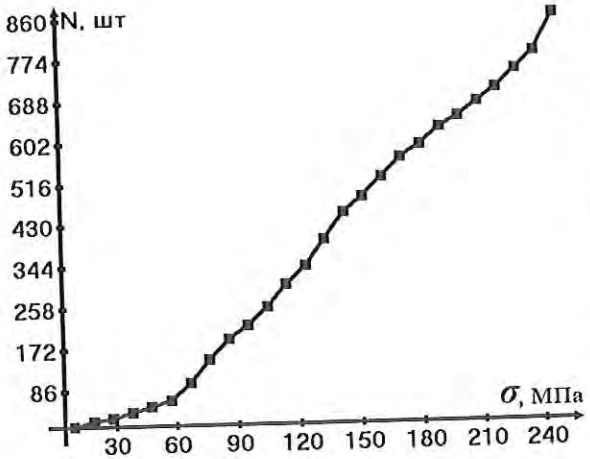


Рисунок 2.12 - Текстолит 1

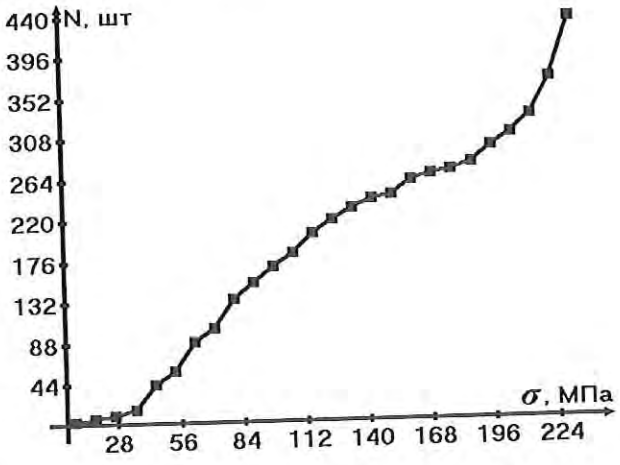


Рисунок 2.13 - Текстолит 2

Таблица 2.1 - Расчёт параметров кинетики накопления трещин

№	Материал		α	β	R^2	$\gamma \cdot 10^{28}$	$U_0 \cdot 10^{19}$	E

1	Известняк	(I)	-5,325	34,505	0,982	–	–	–
		(III)	0,047	37,889	0,916	1,887	1,518	11,856
2	Роговик	(I)	-2,338	34,641	0,966	–	–	–
		(III)	0,037	37,937	0,875	1,478	1,514	15,276
3	Кварц. Диорит	(I)	-1,752	35,099	0,923	–	–	–
		(III)	0,030	37,562	0,969	1,218	1,521	20,076
4	Фенопласт	(I)	0,003	34,941	0,997	0,116	1,414	–
		(II)	0,012	34,961	0,997	0,479	1,416	14,999
		(III)	0,079	34,962	0,997	3,197	1,416	14,917
5	Текстолит (вид 1)	(I)	0,018	38,593	0,998	0,765	1,524	–
		(II)	0,181	41,985	0,998	7,316	1,700	15,743
		(III)	0,339	42,928	0,998	13,767	1,738	11,309
6	Текстолит (вид 2)	(I)	-0,003	34,918	0,980	–	–	–
		(II)	-0,012	34,985	0,970	–	–	–
		(III)	0,084	34,910	0,970	3,401	1,413	9,746

Для иллюстрации полученных зависимостей подставим в указанную формулу типичные значения $A = 100{,}0$; $C = 10{,}0$ м; $K_1 = 0{,}8$; $L \approx 10^{-4}$ м, $Q \approx 6 \cdot 10^{-11}$ Кл/м, $\tau_p \approx 10^{-5}$ с, $T = 293^0$ К, $\varepsilon_0 \varepsilon_1 \approx 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\sigma_p \approx 4{,}33 \cdot 10^4$ Н/м^2, $\gamma \approx 3{,}87 \cdot 10^{-27}$ м^3, $U_0 \approx 1{,}5 \cdot 10^{-19}$ Дж, $k \approx 1{,}3805 \cdot 10^{-23}$ Дж/^{0}К:

$$\frac{d_\varphi}{2\pi} = \frac{1+K_2}{1-K_2} \cdot \frac{1+K_1}{1-K_1} \cdot \frac{A^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_1} Q\, \tau_p \cdot \frac{0{,}037 L^{-2}}{\tau_0} \cdot \exp(-\beta) \cdot \left(\frac{\sigma_P}{E}\right)^{\alpha E - 1} =$$

$$= \frac{1+K_2}{1-K_2} \cdot \frac{9 \cdot 10^4 \cdot 6 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}037 \cdot 10^8 \cdot \exp(-37{,}9)}{8{,}854 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-13}} \left(\frac{4{,}33 \cdot 10^4}{13 \cdot 10^6}\right)^{0{,}04 \cdot 13 - 1} =$$

$$= \frac{1+K_2}{1-K_2} \cdot 0{,}7829 \cdot 10^4 \cdot 15{,}459 = \frac{1+K_2}{1-K_2} \cdot 12{,}103 \cdot 10^4$$

Если $K_2 = -0{,}7$, то $d_\varphi / 2\pi = 21358{,}235$ В и если $K_2 = -0{,}998$, то $d_\varphi / 2\pi = 121{,}151$ В. Расчёты напряжённости ЕЭП показали, что она составляет величину $E \in [22{,}776; 1067{,}9]$ В/м при $K_2 \in [-0{,}99; -0{,}7]$.

Вычислим время до разрушения по формуле (2.40):

$$\tau = \tau_0 * \exp(\beta) * \left(\frac{\sigma}{E}\right)^{1-\alpha \bullet E} = 10^{-13} * \exp(37) * \left(\frac{4{,}33 \cdot 10^4}{13 \cdot 10^6}\right)^{1-0{,}04 \cdot 13} =$$

$$= 10^{-13} * 1{,}172 \cdot 10^{16} * (0{,}333 \cdot 10^{-2})^{0{,}48} = 0{,}691 \cdot 10^{2{,}04} = 75\,c.$$

При увеличении величины разрушающего напряжения будет увеличиваться и время.

3 Свойства тампонажных растворов на основе ЗШО и тампонажных камней.

3.1 Функции, выполняемые тампонажными растворами и предъявляемые к ним требования

При бурении нефтяных и газовых скважин необходимо разобщить пласты горных пород и закрепить стенки скважины. Это позволяет создать долговечный и герметичный канал, соединяющий продуктивный горизонт с устьем скважины. Для этого в ствол скважины спускают *обсадные колонны*, которые собираются (свинчиваются или реже свариваются) из *обсадных труб*, различающихся по диаметру, толщине стенки, марки стали, конструкции соединительных элементов, профилю резьбы и т.д. Так как одно крепление стенок скважины обсадными трубами не создает разобщения пластов, то *затрубное пространство* (т.е. пространство за обсадной колонной) заполняют *тампонажным раствором* при помощи специального оборудования и приспособлений. Этот процесс называется **тампонированием скважины** (поскольку в качестве тампонажного наиболее широко применяется *цемент-*

ный раствор, то и для обозначения работ по разобщению используется термин «**цементирование**»).

Тампонажные растворы (смеси) представляют собой специальные материалы или составы, которые с течением времени могут затвердевать с образованием твердого непроницаемого тампонажного камня либо загустевать или упрочняться, оставаясь вязкой или вязко-пластичной системой.

При любом виде тампонирования тампонажные растворы имеют многофункциональное назначение, но задачи тампонирования определяют некоторую функцию как главную, а остальные – как второстепенные. Так, при тампонировании обсадных колонн главная функция – изолирующая, но в то же время тампонажные растворы должны защищать трубы от преждевременной коррозии и повышать их устойчивость к нагрузкам [29-32].

Функции тампонажного раствора и камня обусловлены целью тампонирования и в зависимости от этого к исходному тампонажному раствору предъявляются следующие *требования* [29-32].

1. Технического характера:

- хорошая текучесть;
- способность проникать в любые поры и микротрещины;
- отсутствие седиментации;
- хорошая сцепляемость с обсадными трубами и горными породами;
- восприимчивость к обработке с целью регулирования свойств;
- отсутствие взаимодействия с тампонируемыми породами и пластовыми водами;
- устойчивость к размывающему действию подземных вод;
- стабильность при повышенных температуре и давлении;
- отсутствие усадки с образованием трещин при твердении;
- раствор на стадиях загустения и схватывания и сформировавшийся камень должны быть непроницаемы для жидкости и газа;
- тампонажный камень должен быть коррозионно- и температуроустойчивым

2. Технологического характера:

- хорошая прокачиваемость насосами;

- небольшие сопротивления при движении;

- малая чувствительность к перемешиванию;

- возможность комбинирования с другим раствором;

- хорошая смываемость с технологического оборудования;

- легкая разбуриваемость камня.

3. Экономического характера:

- сырье должно быть недефицитным и недорогим;

- не влиять отрицательно на окружающую среду.

Получить тампонажные растворы, удовлетворяющие всем требованиям, практически невозможно. Так, растворы, не растекающиеся в трещинах, плохо перекачиваются. Удовлетворяя то или иное требование, необходимо следить за тем, в какой мере будут соблюдаться остальные. Все это определяет существование широкого набора тампонажных растворов и появление все новых и новых составов.

3.2 Материалы для приготовления тампонажных растворов

Материалы для приготовления тампонажных растворов и регулирования их свойств подразделяются следующим образом [29-33].

1. *Основа для приготовления растворов*:

- неорганические вещества: вяжущие (цементы, гипс, известь), коагулирующие (глинистые);

- органические вещества: синтетические смолы, битумы, лигносульфонаты, латексы.

2. *Жидкости затворения*: пресная вода, минерализованная вода, углеводородные жидкости (дизельное топливо, нефть).

3. *Добавки* для регулирования различных свойств тампонажных растворов.

Добавки к тампонажным растворам можно классифицировать по основному своему действию и назначению следующим образом.

1) Регулирование реологических или вяжущих свойств (химические реагенты): ускорители и замедлители сроков схватывания и твердения; пластифицирующие добавки (пластификаторы); понизители фильтрации (водоотдачи); пеногасители.

2) Изменение плотности: утяжеляющие добавки (утяжелители); облегчающие добавки.

3) Придание закупоривающих свойств (наполнители): известняки, пески, различные волокнистые материалы (хлопковые, кожаные волокна, нарезанная фибра и др.), диатомиты, трепелы, опоки, вулканические пеплы, туфы, пемзы, шлаки, зола.

4) уменьшение расхода основных активных компонентов и снижение стоимости (кварцевый песок, шлак, зола и др.).

Добавки также делятся на естественные (природные) (например, известняки, пески, диатомиты, пемзы) и искусственные (например, доменные гранулированные шлаки, зола), неорганические (минеральные) и органические (например, древесные опилки, измельченные скорлупа и отходы целлюлозной промышленности, кожаные волокна).

Оптимальное количество добавок устанавливается экспериментально, при подборе состава раствора, с учетом технико-экономических показателей. Комбинируя компоненты в различных соотношениях, можно составить тампонажные растворы с необходимыми в данных геолого-технических условиях свойствами.

Наибольшая группа тампонажных растворов представлена растворами на основе неорганических веществ, главным образом цементными. В меньшей мере применяются тампонажные рас-творы на основе органических веществ, большинство из которых представлены синтетическими смолами. В последние годы широко распространены комбинированные тампонажные растворы на основе неорганических веществ с добавками полимеров. В каче-

стве жидкой основы растворов применяется в основном вода. Растворы на углеводородных жидкостях применяются редко, в специфических условиях.

В зависимости от вида вяжущего материала *тампонажные цементы* образуются на основе:

- портландцемента;
- доменных шлаков;
- известково-песчаных смесей;
- прочих минеральных материалов (гипсовых, белитовых и др.).

Для цементирования скважин (обсадных колон) применяют только тампонажные растворы на основе портландцемента и доменных шлаков . Кроме этого, широкое разнообразие геолого-технических условий в практике бурения и крепления скважин вызывает необходимость разработки *специальных тампонажных цементов*. Их изготовляют совместным измельчением вяжущей основы, утяжеляющей, активизирующей и других добавок или раздельным измельчением с последующим смешением указанных компонентов.

3.3 Тампонажные портландцементы

Цемент – порошкообразный строительный вяжущий материал, который обладает гидравлическими свойствами, состоит из клинкера и, при необходимости, гипса или его производных и добавок.

Портландцемент – цемент, полученный на основе портландцементного клинкера.

Тампонажные портландцементы – цементы, изготовляемые на основе портландцементного клинкера и предназначенные для цементирования нефтяных, газовых и других скважин [34, 35].

Портландцемент относится к *гидравлическим вяжущим веществам*, т.е. он твердеет и длительно сохраняет свои свойства на воздухе и в воде. Портландцемент представляет собой порошок определенного минералогического состава, получаемый путем совместного тонкого измельчения *клинкера*, гип-

са и активных добавок. При помоле к клинкеру добавляют 3-6 % гипса и вводят 10-14 % активных минеральных добавок. Они улучшают некоторые свойства раствора и камня, а также экономят дорогостоящий клинкер.

Плотность тампонажного портландцемента колеблется от 3,0 до 3,3 г/см^3, *насыпная масса* в рыхлом состоянии 0,8-1,2 г/см^3 и 1,7-1,9 г/см^3 – в уплотненном. *Угол естественного откоса* – 39-43°. *Фракционный состав* зависит от степени измельчения и для обычных портландцементов примерно следующий: 30-45 % частиц размером 10 мкм; 10-20 % размером 10-20 мкм; 10-20 % размером 20-30 мкм; 10-20 % размером 30-50 мкм; 10-25 % размером 50 мкм. На свойства цемента наибольшее влияние оказывают самые тонкие фракции. *Удельная поверхность* порошка – это суммарная поверхность частиц единицы массы или объема и зависит от гранулометрического состава. Для обыкновенного портландцемента равна 280-350 м^2/кг.

Классификация и номенклатура обязательных показателей качества тампонажного портландцемента регламентируются ГОСТ 1581-96 [35].

Тампонажно-технические свойства цемента – совокупность свойств цемента, характеризующих его пригодность для тампонирования скважин.

Физико-механические свойства цементов типов I, II и III определяют по ГОСТ 26798.1-96 [36].

В практике бурения одна из исходных (обычно задаваемых) характеристик цементного раствора – **водоцементное отношение** (сокращенно **В/Ц**) – отношение массы воды затворения к массе цемента. В зависимости от геолого-технических условий и технологии работ водоцементное отношение колеблется в пределах от 0,4 до 0,65. В указанных пределах цементные растворы подвижны и удовлетворительно перекачиваются насосами. Также часто пользуются другими понятиями: **цементно-водное отношение** (сокращенно **Ц/В**) – величина, обратная водоцементному отношению и **водотвердое отношение** (сокращенно **В/Т**) – отношение массы воды затворения к массе твердых составляющих раствора (цемента, песка, глины, золы и др.) [34, 37].

Выбирая тампонажный раствор и регулируя соответствующим образом его свойства, в конкретной ситуации стараются получить тампонажный камень с определенными параметрами.

Цементный камень – материал, образующийся в результате гидратации и твердения цемента [34]. Основные измеряемые характеристики тампонажного камня следующие: прочность при изгибе и на сжатие (для нетвердеющих составов – пластическая прочность), проницаемость, коэффициент фильтрации, объемные изменения при твердении, выход тампонажного камня, коррозионная устойчивость и некоторые другие.

4 Программа и методика проведения экспериментальных исследований свойств тампонажных растворов на основе ЗШО

4.1 Программа исследовательских испытаний

Весьма актуальными являются задачи получения тампонажных растворов с заданными характеристиками и снижения стоимости тампонажного раствора на основе цемента. Для этого в растворы можно вводить различные химические и минеральные добавки, произвести частичную замену портландцемента на золошлаковые отходы. В качестве таких отходов может быть использована зола гидроотвалов или зола сжигания водоугольного топлива.

Введение золы и других добавок в состав раствора оказывает влияние на свойства раствора, физико-механические и фильтрационные свойства цементного камня и, как следствие, на эффективность тампонажных работ. Для оценки этого влияния были проведены экспериментальные исследования свойств тампонажных растворов на основе ЗШО и прочностных характеристик затвердевшего камня.

Испытания тампонажных растворов по настоящей программе проводили в следующем объеме:

1. Определение водоотделения тампонажного раствора;
2. Определение плотности тампонажного раствора;
3. Определение эффективной вязкости тампонажного раствора;
4. Определение выхода тампонажного камня;
5. Определение прочности тампонажного камня на сжатие.

Лабораторные испытания проводили в КузГТУ на базе лаборатории кафедры теоретической и геотехнической механики. Тампонажные растворы приготавливали с использованием портландцемента ПЦ400 ГОСТ 31108-2003 Топкинского цементного завода. Испытывали растворы с водотвердым

отношением В:Т = 1:1. В качестве активных добавок-наполнителей использовали сухую золу-уноса (г. Иркутск, ТЭЦ-9, участок 1, Ad=99,4 %, 21.01.2013 г.) и золу гидроотвала (г. Иркутск, Ad=99,9 %, 21.01.2013г.), а также золу сжигания водоугольного топлива из промпродукта (г. Мждуреченск, ДКВР-10-13, 26.11.2012 г.). Отношение количества золы к количеству цемента (по массе) принимали равным 0 % (без золы), 20 %, 50 %, 80 % и 100 % (без цемента). Также исследовали растворы с добавками хлористого кальция ($CaCl_2$) и жидкого стекла ($Na_2O{\cdot}nSiO_2$). Хлористый кальций, растворенный в воде, и жидкое стекло добавляли в воду перед засыпкой цемента и перемешиванием раствора. Количество добавок принимали в соответствии с существующими рекомендациями [33]: хлористый кальций – 3 % массы цемента в пересчете на сухое вещество; жидкое стекло – 5 % массы цемента. Растворы для испытаний приготавливали на водопроводной питьевой воде. Продолжительность перемешивания раствора, принятая на основании опытных замесов, равнялась 1 мин.

4.2 Определение водоотделения тампонажного раствора

4.2.1 Методика экспериментальных исследований

Водоотделение цемента – количество воды, отделившейся при расслоении цементного теста вследствие осаждения частиц цемента.

Поскольку тампонажный раствор представляет собой двухфазную водотвердую смесь, то сразу же после его приготовления начинается процесс разделения фаз: цементные частицы начинают оседать (*седиментировать*) на дно емкости, а жидкая фаза поднимается вверх. Происходит уплотнение тампонажного раствора в нижней части емкости. При этом над осевшей цементной массой образуется слой практически чистой воды. На процесс седимен-

тации и водоотделения оказывают влияние концентрация твердых частиц, их размер и вязкость жидкой фазы.

Средства испытания

Мерные цилиндры вместимостью 20 $см^3$ с ценой деления не более 0,2 $см^3$ и 250 $см^3$ высотой градуированной части не менее 230 и не более 250 мм, пипетки.

Подготовка и проведение испытания

1. Готовят тампонажный раствор в соответствии с п. 4.1.

2. Тампонажный раствор заливают в два цилиндра до отметки 250 $см^3$ в каждом и оставляют для отстаивания в соответствии с рисунком 4.1. Для предотвращения испарения жидкости цилиндры сверху покрывают смоченной в воде фильтровальной бумагой. В течение всего времени испытания цилиндры должны стоять неподвижно и не подвергаться толчкам.

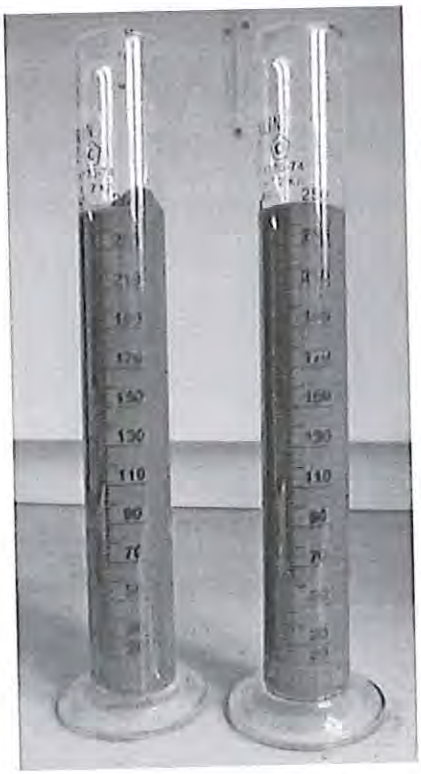


Рисунок 4.1 – Определение водоотделения тампонажного раствора

3. Через 2 ч ± 5 мин отделившуюся на поверхности раствора воду отбирают пипеткой в мерный цилиндр вместимостью 20 $см^3$ и замеряют объем

отделившейся воды в каждом цилиндре. Объем отделившейся воды (водоотделение) в миллилитрах регистрируют в рабочем журнале.

4. За водоотделение принимают среднеарифметическое значение результатов двух параллельных определений, расхождение между которыми не должно быть более 0,2 мл. Результат вычисления округляют до 0,1 мл.

4.2.2 Результаты исследований

Исследования выполнены в соответствии с вышеприведенной методикой. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 4.7.

4.3 Определение плотности тампонажного раствора

4.3.1 Методика экспериментальных исследований

Плотность тампонажного раствора – отношение массы тампонажного раствора к его объему.

Уменьшение плотности тампонажного раствора можно добиться путем: 1) увеличения водотвердого отношения; 2) введения в раствор добавок, требующих повышенных количеств воды; 3) введения добавок (наполнителей), имеющих меньшую плотность, чем цемент; 4) аэрации. Утяжеление растворов осуществляется введением утяжеляющих добавок.

Плотность тампонажного раствора $\rho_р$, г/см^3 и В/Т связаны следующей формулой

$$\rho_р = \frac{\rho_т \cdot \rho_ж \cdot (1+В/Т)}{\rho_ж + \rho_т \cdot (В/Т)}, \qquad (4.1)$$

где $\rho_т$ – средняя плотность твердой фазы, г/см^3;

$\rho_ж$ – плотность жидкости затворения, г/см^3.

При однокомпонентной твердой фазе тампонажного раствора, т.е. без утяжеляющих/облегчающих добавок, средняя плотность твердой фазы численно равна плотности цемента $\rho_ц$.

Для измерения плотности тампонажного раствора могут быть использованы:

- весы рычажные-плотномер;
- ареометр;
- пикнометр.

Средства контроля

Пикнометр вместимостью (100 ± 5) см^3 в соответствии с рисунком 4.2, весы с погрешностью не более ± 0,01 г.

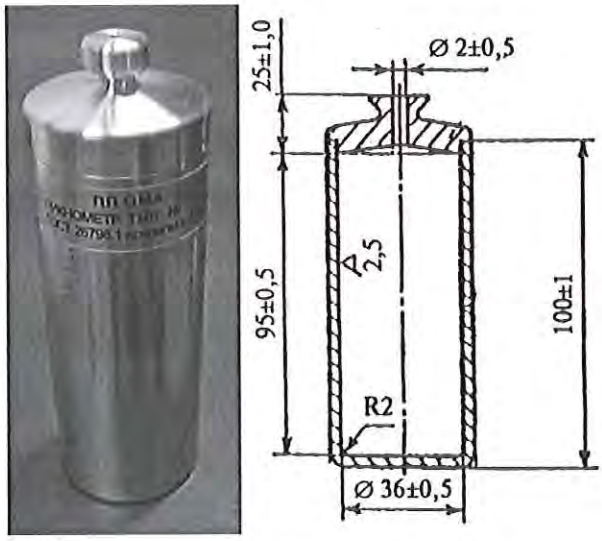


Рисунок 4.2 – Пикнометр для определения плотности тампонажного раствора

Подготовка и проведение испытания

1. Определяют массу чистого сухого пикнометра.

2. Готовят тампонажный раствор в соответствии с п. 4.1.

3. Заполняют раствором пикнометр и закрывают его крышкой, при этом раствор должен заполнить канал в крышке пикнометра. Избыток раствора, выступивший из отверстия в крышке, удаляют влажной тканью.

4. Определяют массу пикнометра, заполненного тампонажным раствором.

Обработка результатов

Плотность тампонажного раствора $\rho_р$, г/см^3, вычисляют по формуле

$$\rho_р = \frac{m_2 - m_1}{V}, \qquad (4.2)$$

где m_1 – масса пустого пикнометра, г;

m_2 – масса пикнометра с тампонажным раствором, г;

V – вместимость пикнометра, см^3.

Результат вычисления округляют до 0,01 г/см^3.

4.3.2 Результаты исследований

Исследования выполнены в соответствии с вышеприведенной методикой. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 4.7.

4.4 Определение эффективной вязкости тампонажного раствора

4.4.1 Методика экспериментальных исследований

Вязкость – это свойство жидкости оказывать сопротивление ее течению под действием сдвига.

Различают *динамическую вязкость* η и *кинематическую вязкость* ν .

Единица измерения *динамической вязкости* η (коэффициент динамической вязкости, коэффициент вязкости) – «Паскаль·секунда» (Па·с).

Как общее правило, вязкость жидкости увеличивается при добавлении к ней некоторого количества твердых частиц. Это обусловлено необходимостью дополнительных затрат энергии на создание потоков вокруг этих частиц. В зависимости от вида дисперсной фазы и ее концентрации такие системы, часто называемые пластичными или вязко-пластичными, могут приближаться по свойствам к жидким или твердым телам. Экспериментальные ис-

следования [33] показывают, что ориентировочно растворы с цементно-водным массовым отношением Ц:В ≥ 1:0,5 можно рассматривать как вязкопластичные жидкости, с Ц:В ≤ 1:1 – как нестабильные суспензии, а растворы промежуточных концентраций – как обладающие проявлением и вязкопластичных свойств и седиментационной неустойчивостью. Вязкость суспензий существенно зависит от скорости сдвига $\dot{\gamma}$, $с^{-1}$. В отличие от «ньютоновской» постоянной вязкости переменную величину $\tau/\dot{\gamma}$ (где τ – напряжение сдвига, Па) называют эффективной вязкостью $\eta_{эф}$, Па·с, конкретной для определенных условий измерений, которые должны быть указаны. Реологические характеристики тампонажных растворов (напряжение сдвига τ и коэффициент эффективной вязкости $\eta_{эф}$) определяют на вискозиметрах, из которых наиболее распространенными являются ротационные вискозиметры.

Средства контроля

Ротационный вискозиметр Brookfield модели LVDV-II+Pro в соответствии с рисунком 4.3, который предназначен для измерения вязкости жидкостей при заданных скоростях сдвига и проведения реологических исследований неньютоновских систем.

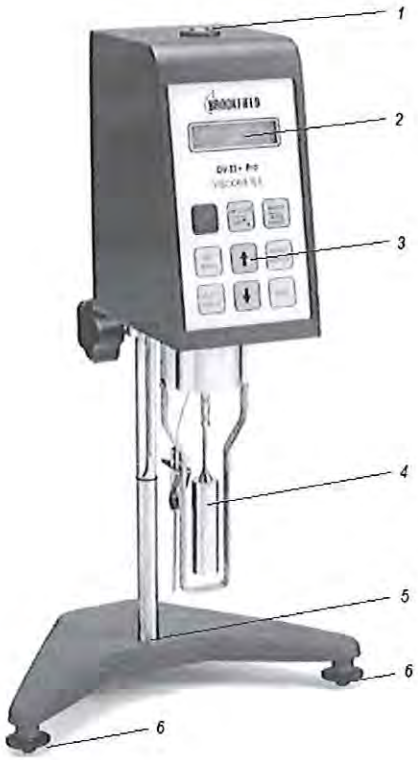


Рисунок 4.3 – Общий вид вискозиметра Brookfield LVDV-II+Pro

1 – пузырьковый уровень; *2* – дисплей; *3* – панель управления; *4* – шпиндель; *5* – штатив; *6* – регулировочные винты

Адаптер для малых образцов *SSA* (измерительная система типа коаксиальных цилиндров – шпиндель *SC4-18* (биконический), камера для образцов с температурным датчиком RTD *SC4-13RPY*, объем образца 8 мл).

Подготовка и проведение испытания

1. Готовят тампонажный раствор в соответствии с п. 4.1.

2. Испытания проводят в соответствии с инструкцией к прибору.

3. Результаты определения реологических характеристик оформляют в виде таблиц или изображают в виде графика зависимости напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$.

4.4.2 Результаты исследований

Исследования выполнены в соответствии с вышеприведенной методикой. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблицах 4.1-6.

Таблица 4.1 – Коэффициент эффективной вязкости тампонажных растворов на основе цемента с добавлением сухой золы-уноса

Состав раствора, %		В:Т	Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{эф}\cdot10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
цемент	зола		1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
100	–	1:1	0	-	7,59	8,59	8,82	8,72
80	20	1:1	0	-	6,12	7,26	6,73	6,16
50	50	1:1	0	8,19	9,26	9,59	7,76	6,01
20	80	1:1	0	-	27,12	21,51	17,42	13,35
–	100	1:1	0	43,01	32,17	21,27	14,03	11,95

Из данных таблицы 4.1 видно, что для растворов с концентрацией сухой золы-уноса от 0 до 50 % реологические характеристики определяются главным образом цементом – значения эффективной вязкости этих растворов

практически совпадают. Однако растворы с концентрацией золы 80 % и более приобретают псевдопластический характер течения и имеют в несколько раз большие значения коэффициента эффективной вязкости, что свидетельствует о значительном влиянии золы на реологическое поведение растворов данного состава.

Таблица 4.2 – Коэффициент эффективной вязкости тампонажных растворов на основе цемента с добавлением золы гидроотвала

Состав раствора, %		В:Т	Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{эф} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
цемент	зола		1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
100	–	1:1	0	-	7,59	8,59	8,82	8,72
80	20	1:1	0	-	2,09	2,37	2,35	2,72
50	50	1:1	0	-	2,49	2,94	2,48	2,13
20	80	1:1	0	-	5,22	2,19	2,39	2,23

Данные таблицы 4.2 показывают, что зола гидроотвала уменьшает эффективную вязкость раствора, как бы «разжижая» его. Такое влияние обусловлено высокой влажностью золы (20-30 % от массы).

Таблица 4.3 – Коэффициент эффективной вязкости тампонажных растворов на основе цемента с добавлением золы сжигания водоугольного топлива из промпродукта

Состав раствора, %		В:Т	Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{эф} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
цемент	зола		1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
100	–	1:1	0	-	7,59	8,59	8,82	8,72
80	20	1:1	17,99	-	24,44	17,84	13,78	11,15
50	50	1:2	0	-	1,49	1,65	2,02	2,94
20	80	1:2	0	-	8,73	7,95	6,74	5,88
–	100	1:2	0	-	20,79	15,69	11,96	9,42

Анализ данных таблицы 4.3 показывает, что наибольшее влияние на реологические свойства растворов оказывает зола сжигания водоугольного топлива, приготовленного из промпродукта. Общая закономерность для та-

ких растворов – резкое возрастание эффективной вязкости. Из-за этой особенности данной золы эксперименты для концентраций 50 % и более проводили с растворами с В:Т =2:1, т.к. при В:Т =1:1 вязкость достигает 400 мПа·с и более, вплоть до 30000 мПа·с. Следует отметить, что у раствора с концентрацией золы 50 % наблюдается отличный от остальных дилатантный характер течения – рост вязкости при увеличении скорости сдвига.

Таблица 4.4 – Коэффициент эффективной вязкости тампонажных растворов на основе цемента с добавлением хлористого кальция и жидкого стекла

Состав раствора		Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{эф} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
В:Ц	добавка, % массы цемента	1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
1:1	–	175,46	54,21	26,73	20,16	16,74	15,59
1:1	3 % $CaCl_2$	38,22	13,39	14,99	15,49	16,07	19,09
1:1	5 % жидкого стекла	1102,26	246,77	96,99	-	-	-

Из таблицы 4.4 видно, что добавка хлористого кальция незначительно влияет на величину вязкости, однако у такого раствора проявляется дилатантный характер течения. Раствор с добавкой жидкого стекла имеет выраженные псевдопластичные свойства и гораздо более высокое значение коэффициента эффективной вязкости. При скорости сдвига выше 39,6 $с^{-1}$ измерить вязкость данного раствора оказалось технически невозможно (данной измерительной системой при данных условиях).

Таблица 4.5 – Коэффициент эффективной вязкости тампонажных растворов на основе цемента с добавлением сухой золы-уноса и жидкого стекла

Состав раствора, %		В:Т	Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{эф} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
Цемент	Добавка		1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
100	–	1:1	175,46	54,21	26,73	20,16	16,74	15,59
100	5 % жидк. ст.	1:1	1102,26	246,77	96,99	-	-	-
80	20 % золы + 5 % жидк. ст.	1:1	998,79	228,65	92,35	49,42	32,84	-

50	50% золы + 5 % жидк. ст.	1:1	373,72	79,03	39,17	24,61	18,09	14,76
–	100 % золы + 5 % жидк. ст.	1:1	79,98	32,51	23,22	20,53	19,41	19,83

Как было показано ранее, добавление жидкого стекла к цементному раствору приводит к возрастанию его эффективной вязкости и проявлению псевдопластичного характера течения. Как видно из таблицы 4.5 жидкое стекло слабо реагирует с сухой золой-уноса и реологические свойства растворов с концентрацией золы 50 % и более практически не отличаются от свойств этих же растворов без добавки жидкого стекла и близки со свойствами «чистого» цементного раствора.

Таблица 4.6 – Коэффициент эффективной вязкости тампонажных растворов на основе цемента с добавлением золы гидроотвала и жидкого стекла

Состав раствора, %		В:Т	Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{эф} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
Цемент	Добавка		1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
100	–	1:1	175,46	54,21	26,73	20,16	16,74	15,59
100	5 % жидк. ст.	1:1	1102,26	246,77	96,99	-	-	-
80	20 % золы + 5 % жидк. ст.	1:1	666,86	166,82	72,61	41,46	32,22	24,99
50	50% золы + 5 % жидк. ст.	1:1	22,19	27,47	15,99	12,01	9,66	8,67
–	100 % золы + 5 % жидк. ст.	1:1	0	-	-	-	1,39	1,83

Данные таблицы 4.6 показывают, что зола гидроотвала так же слабо реагирует с жидким стеклом. Его добавление в растворы с концентрацией золы 50 % и более приводит к незначительному увеличению вязкости в сравнении с теми же растворами без жидкого стекла. При этом значения коэффициента эффективной вязкости остаются ниже аналогичных значений для растворов на основе цемента без добавок.

4.5 Определение выхода тампонажного камня

4.5.1 Методика экспериментальных исследований

Седиментационная устойчивость характеризуется **выходом тампонажного камня,** определяемого отношением объема осевшей цементной массы к первоначальному объему раствора. Величина выхода тампонажного камня зависит от концентрации раствора, вида и количества применяемых добавок тампонажного раствора. Также водоотдача взаимосвязана с выходом тампонажного камня растворов.

Средства испытания

Мерный цилиндр вместимостью 100 $см^3$ с ценой деления не более 0,2 $см^3$.

Подготовка и проведение испытания

1. Готовят тампонажный раствор в соответствии с п. 4.1.

2. Тампонажный раствор заливают в цилиндр до отметки 100 $см^3$ и оставляют для отстаивания. Для предотвращения испарения жидкости цилиндр сверху покрывают смоченной в воде фильтровальной бумагой. В течение всего времени испытания цилиндр должен стоять неподвижно и не подвергаться толчкам.

3. Через 1-1,5 ч определяют объем осадка. Объем осадка в миллилитрах регистрируют в рабочем журнале.

4. За водоотделение принимают среднеарифметическое значение результатов двух параллельных определений, расхождение между которыми не должно быть более 0,2 мл. Результат вычисления округляют до 0,1 мл.

Обработка результатов

Выход тампонажного камня $B_к$, %, вычисляют по формуле

$$B_к = \frac{V_o}{V_p} \cdot 100, \qquad (4.3)$$

где V_o – объем осадка в цилиндре, мл;

$V_р$ – объем раствора в цилиндре, мл.

4.5.2 Результаты исследований

Исследования выполнены в соответствии с вышеприведенной методикой. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 4.7.

4.6 Определение прочности тампонажного камня на сжатие

4.6.1 Методика экспериментальных исследований

Прочность – способность материала не разрушаться от возникающих внутренних напряжений при воздействии внешних нагрузок. Прочность материала характеризуется пределом прочности, определенным при данном виде деформации. **Предел прочности тампонажного камня при одноосном сжатии** – предельное одноосное сжимающее напряжение, при котором происходит разрушение тампонажного камня.

Тампонажный камень воспринимает часть нагрузок, приходящихся на обсадную колонну, поэтому увеличение механической прочности приведет к некоторому повышению несущей способности обсадных труб. Источниками разрушающей нагрузки являются: горное давление и гидростатическое давление столба жидкости, внутреннее давление в обсадной колонне, ударные нагрузки в результате спуско-подъемных операций (СПО) при бурении скважин, высокие давления при проведении гидроразрыва пластов, перепад давления при испытании и освоении скважин и др.

Прочность цементного камня непостоянна. Первое время после твердения она быстро возрастает, затем постепенно стабилизируется, а через некоторое время начинает медленно снижаться.

При определении прочности тампонажного камня на сжатие, за основу была принята методика определения прочности цементного камня по ГОСТ 30744-2001 [37].

Средства испытания

Трехгнездовые разъемные формы размером 70х70х70 мм для изготовления образцов-кубиков. Пресс для испытания на сжатие. Весы с погрешностью не более 2 г. Штангенциркуль.

Подготовка и проведение испытания

1. Перед изготовлением образцов внутреннюю поверхность стенок формы и стыки наружных стенок формы друг с другом смазывают тонким слоем машинного масла.

2. Готовят тампонажный раствор в соответствии с п. 4.1.

3. Подготовленную форму наполняют раствором в два приема при непрерывном ручном перемешивании его в чаше – сначала на половину ее глубины поочередно во все отделения, затем форму полностью заполняют вторым слоем.

Для каждого установленного срока испытания изготавливают по три образца-кубика (одна форма).

4. Через 5 сут с момента изготовления формы с образцами осторожно расформовывают и образцы маркируют. Образцы, имеющие через 5 сут прочность, недостаточную для их расформовки без повреждения, допускается расформовывать через 10 сут с указанием этого срока в рабочем журнале.

Перед испытанием расформованные образцы взвешивают с целью определения их средней плотности, а также контроля содержания воздуха в тампонажном растворе. Результаты заносят в рабочий журнал.

5. После расформовки образцы хранят в помещении с температурой (20 ± 3) °С и относительной влажностью (65 ± 10) %.

6. Образцы испытывают по истечении 28 сут с момента их изготовления. Перед испытанием штангенциркулем измеряют линейные размеры образцов с погрешностью не более 0,1 мм. Результаты заносят в рабочий журнал.

8. Образец устанавливают на пресс любыми боковыми гранями, находившимися при изготовлении в контакте с боковыми поверхностями формы. Образец должен быть отцентрирован по верхней нагружающей плите. Образцы испытывают в соответствии с инструкцией к испытательной машине.

Нагружение образцов производят непрерывно со скоростью, обеспечивающей повышение расчетного напряжения в образце до его полного разрушения в пределах (0,6±0,4) МПа/с. При этом время нагружения одного образца должно быть не менее 30 с.

При испытании не допускается регулировка машины, если образец проявляет пластическую деформацию.

9. Зафиксированное силоизмерителем пресса максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принимают за разрушающую нагрузку и записывают его в рабочий журнал.

Обработка результатов

Предел прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа, отдельного образца вычисляют по формуле

$$R_{сж} = \frac{F_{сж}}{S}, \qquad (4.4)$$

где $F_{сж}$ – разрушающая нагрузка, Н;

S – площадь рабочего сечения образца (опорной поверхности), мм^2.

За предел прочность на сжатие принимают среднеарифметическое значение результатов испытаний всех образцов, изготовленных из раствора одного состава. Результат вычисления округляют до 0,1 МПа.

Если один из трех результатов испытаний отличается более чем на 10 % от среднеарифметического значения, этот результат следует исключить и рассчитывать среднеарифметическое значение оставшихся двух результатов.

4.6.2 Результаты исследований

Исследования выполнены в соответствии с вышеприведенной методикой. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Характеристика тампонажных растворов с различными добавками

№ опыта	В:Т	Состав раствора, %				Водоотделение, мл	Плотность раствора, г/см^3	Выход камня, %	Предел прочности образца при сжатии в возрасте 28 сут, МПа
		цемент	зола	$CaCl_2$	жидкое стекло				
Портландцемент без золы									
1.	1:1	100	-	-	-	50,0	1,629	80	7,18
2.	1:1	100	-	3	-	-	-	-	9,19
3.	1:1	100	-	-	5	10,0	-	96	2,43
С добавкой сухой золы-уноса									
4.	1:1	80	20	-	-	35,0	1,433	86	5,84
5.	1:1	50	50	-	-	32,5	1,378	87	3,54
6.	1:1	20	80	-	-	22,5	1,328	91	1,20
7.	1:1	-	100	-	-	42,5	1,360	83	0,06
8.	1:1	80	20	3	-	-	-	-	8,49
9.	1:1	50	50	3	-	-	-	-	3,18
10.	1:1	80	20	-	5	7,5	-	97	2,10
11.	1:1	50	50	-	5	10,0	-	96	1,43
С добавкой золы гидроотвала									
12.	1:1	80	20	-	-	90,0	1,465	64	3,55
13.	1:1	50	50	-	-	75,0	1,413	70	3,13
14.	1:1	20	80	-	-	60,0	1,323	76	0,78
15.	1:1	-	100	-	-	70,0	1,244	72	0,05
16.	1:1	80	20	3	-	-	-	-	7,74
17.	1:1	50	50	3	-	-	-	-	4,32
18.	1:1	80	20	-	5	17,5	-	93	1,74
19.	1:1	50	50	-	5	25,0	-	90	1,10
С добавкой золы сжигания водоугольного топлива из промпродукта									
20.	1:1	50	50	-	-	52,5	1,378	79	2,94

Анализ результатов экспериментальных данных, приведенных в таблице 4.7, позволяет сделать следующие выводы.

Добавление золы в тампонажный раствор приводит к снижению прочности цементного камня, полученного из такого раствора. Так добавка 50 % сухой золы-уноса снижает прочность камня в 2 раза, также как и добавка 20 % золы гидроотвала. Такое влияние золы гидроотвала можно объяснить высоким содержанием влаги, что приводит к увеличению водоцементного отношения. Помимо этого сухая зола-уноса увеличивает выход тампонажного камня, то есть повышает седиментационную устойчивость растворов.

Добавка хлористого кальция к цементному раствору без золы увеличивает прочность на 30 %. С увеличением содержания золы эффект снижается, однако камни из таких растворов имеют прочность выше, чем камни из таких же растворов без хлористого кальция.

Добавка жидкого стекла наиболее эффективно действует на повышение стабильности растворов. Но при этом происходит значительное снижение прочности тампонажного камня как по сравнению с образцами из раствора без добавок, так и с образцами из растворов с добавкой золы.

5 Исследование закономерностей изменения удельного электрического сопротивления образцов горных пород от степени их нагружения

В главе представлены результаты проведенных лабораторных исследований удельного электрического сопротивления (УЭС) образцов горных пород при их нагружении до предразрушающего состояния. Проведена статистическая обработка измерений, в ходе которой выявлены аномальные значения и определенны доверительные интервалы удельного электрического сопротивления горных пород, получены функциональные зависимости относительного УЭС от механического напряжения.

5.1 Лабораторная установка и проведение измерений по определению УЭС образцов горных пород таштагольского месторождения в предразрушающем состоянии

Для исследований были подготовлены образцы горных пород и собрана стандартная установка по исследованию УЭС. Всего было исследовано 240 образцов для 7 типов горных пород. Использованные приборы и оборудование позволили провести измерения с инструментальной погрешностью не более 2 %. Все исследования проведены в соответствии с ГОСТ 25494-82.

Для измерения удельного электросопротивления горных пород была собрана установка, показанная на рисунке 5.1. Для испытаний были изготовлены образцы правильной цилиндрической формы. Измерения проводились двухэлектродной установкой, ток через образец и измерение падения напряжения на нем производились с помощью цифровых вольтметра и амперметра, нагружение производилось прессом П-50. Для улучшения контакта электродов с поверхностью образцов их торцы графитизировались.

Расчет УЭС породы проводился по формуле

$$\rho = U \cdot S / I \cdot b, \qquad (5.1)$$

где U - падение напряжения на образце, В; I - ток, измеряемый амперметром, А; S - площадь сечения образца, м^2; b - расстояние между электродами АВ, м (высота образца).

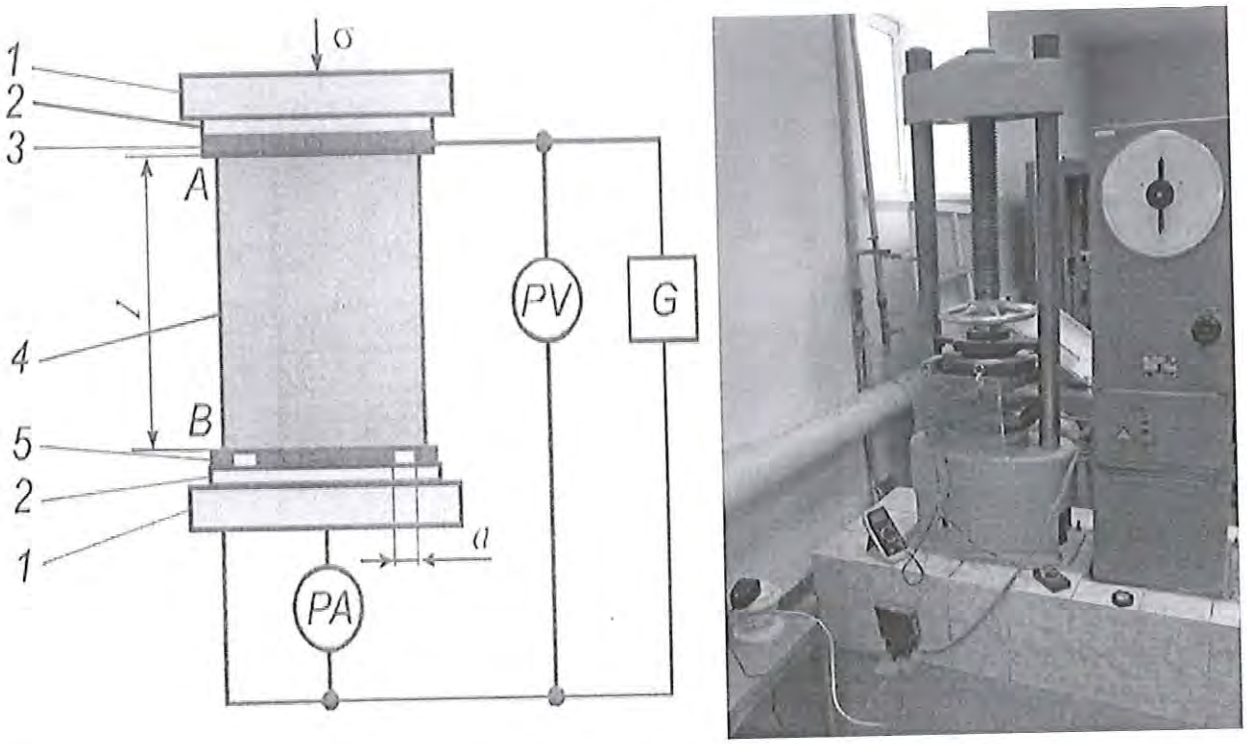


Рисунок 5.1 – Двухэлектродные установка для измерения электрического сопротивления образцов горных пород: 1 - плита пресса; 2 - изолирующая прокладка; 3 - токопроводящий пластинчатый электрод **A;** 4 - образец; 5 - токопроводящий пластинчатый электрод с «охранным кольцом» **B;** PV - вольтметр; PA - амперметр; G - батарея питания

Испытания проводились следующим образом. Образец с графитизированными торцами устанавливался по центру плиты пресса и измерялось электросопротивление образца в ненагруженном состоянии. Затем образец нагружался до 20кН, что обеспечивало плотный контакт между образцом и электродами. С отметки 25кН и далее через интервал в 25кН образец нагружался до предразрушающего состояния. На каждом этапе нагружения снимались показания вольтметра и амперметра.

5.2 Статистическая обработка результатов полученных измерений

Статистическая обработка результатов полученных измерений была проведена по известным стандартным методикам [1].

По формулам (5.2, 5.3) сначала рассчитывались среднее арифметическое значение УЭС и стандартное отклонение результатов отдельных измерений от среднего:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i , \tag{5.2}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} , \tag{5.3}$$

где n – число наблюдений, x_i – измеренные значения УЭС.

Далее отбрасывались значения, в которых отклонение результатов от среднего значения превышает утроенное стандартное отклонение и повторно определялось стандартное отклонение для оставшихся результатов.

По формуле (5.4) находили среднеквадратичное отклонение

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} . \tag{5.4}$$

Доверительный интервал определялся по формуле

$$\varepsilon = \pm t S_{\bar{x}} , \tag{5.5}$$

где t – коэффициент Стьюдента.

Коэффициент t в зависимости от доверительной вероятности P и числа результатов наблюдений n находят по таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Коэффициент t в зависимости от доверительной вероятности P

K	P = 0,95	P = 0,99	K	P = 0,95	P = 0,99
1	12,706	63,657	14	2,145	2,997
2	4,303	9,925	16	2,120	2,921
3	3,182	5,841	18	2,101	2,878
4	2,776	4,604	20	2,086	2,845

5	2,571	4,032	22	2,074	2,819
6	2,447	3,707	24	2,064	2,797
7	2,365	2,998	26	2,056	2,779
8	2,306	3,355	28	2,048	2,763
9	2,262	3.250	30	2,043	2,750
10	2,228	3,169		1,960	2,576
12	2,179	3,055			

При n > 30 следует использовать последнюю строку таблицы.

В таблице 5.2 приведены результаты расчета доверительных интервалов определения УЭС для всех исследованных типов пород.

Таблица 5.2 - Доверительные интервалы определения УЭС пород

Тип горной породы	Среднее значение, Ом·м	Доверительный интервал, Ом·м
Кварцит	24895	5625
Порфирит	33786	5554
Магнетит	0,498	0,119
Сиенит	31162	4625
Скарн	34669	5341
Рудный скарн	4050	1836
Сланец	18636	3795

5.3 Функциональные зависимости изменения УЭС пород от механического напряжения

Для получения функциональных зависимостей изменения УЭС пород от механических напряжений использовали метод наименьших квадратов. При этом УЭС представлялось в виде отношения ρ_i/ρ_0, где ρ_i – текущее значение УЭС при нагружении, ρ_0 – УЭС при нагрузке, равной нулю. Примеры корреляционных полей для обработки результатов измерений представлены на рисунках 5.2-5.8.

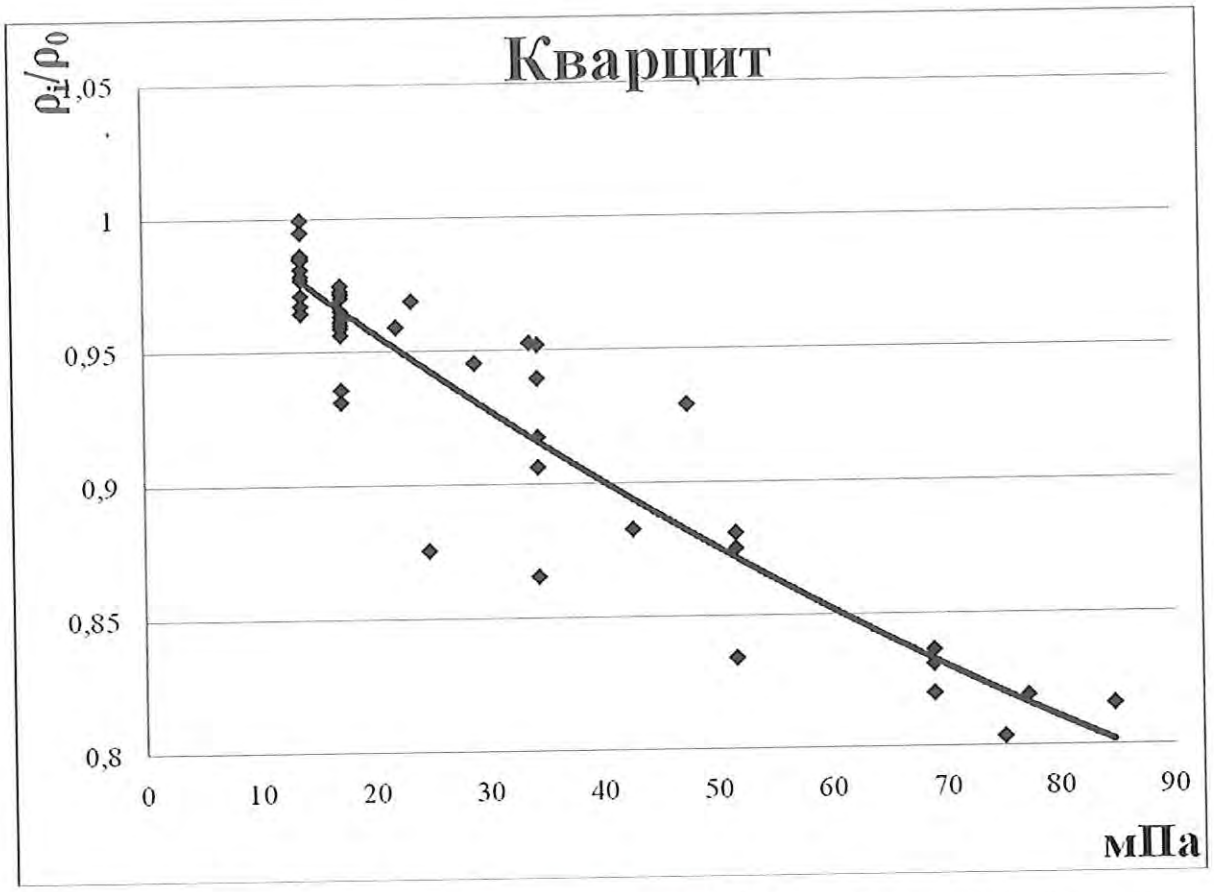


Рисунок 5.2 - Зависимость относительного УЭС от механических напряжений для кварцита

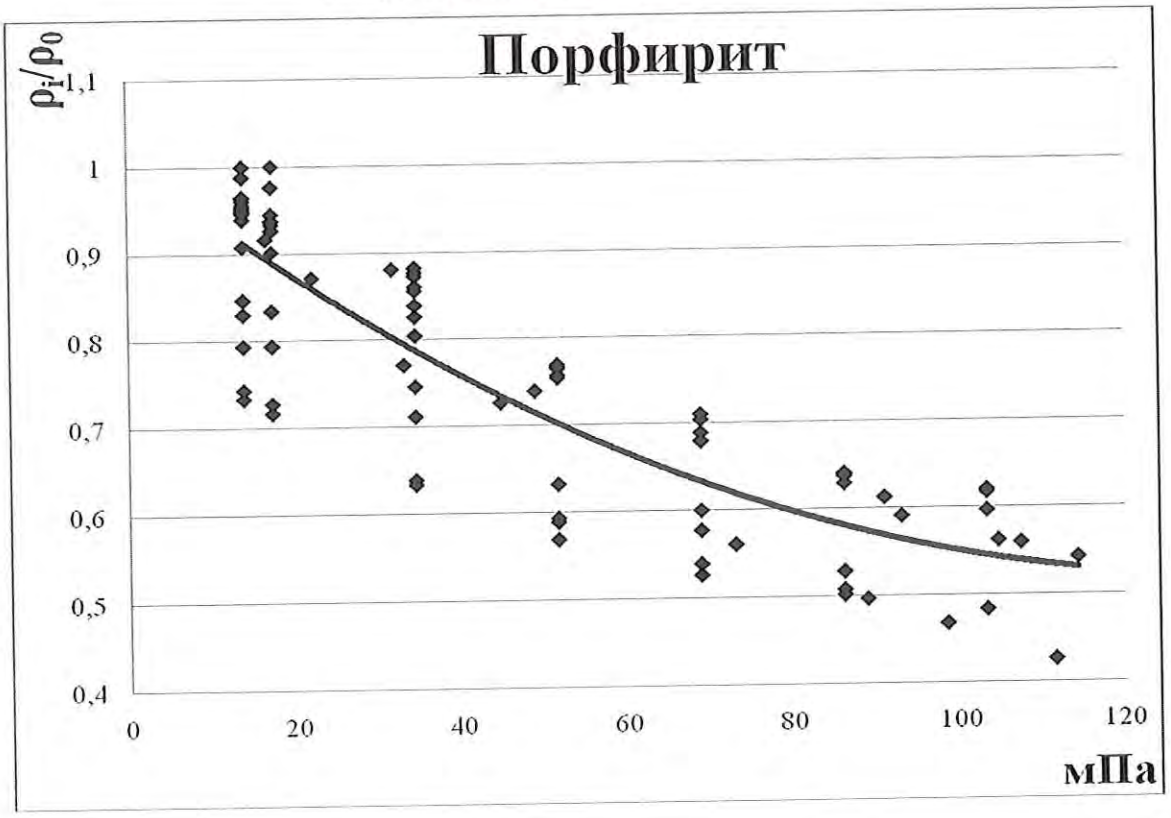


Рисунок 5.3 - Зависимость относительного УЭС от механических напряжений для порфирита

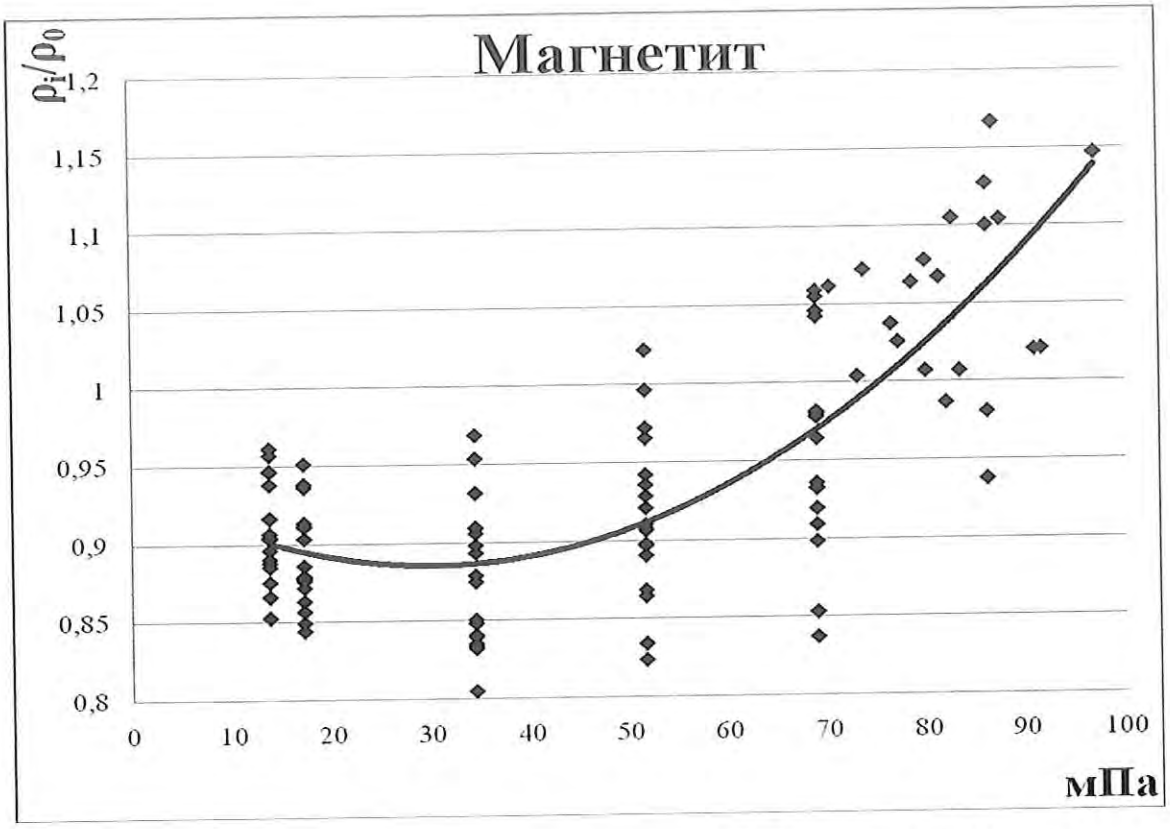


Рисунок 5.4 - Зависимость относительного УЭС от механических напряжений для магнетита

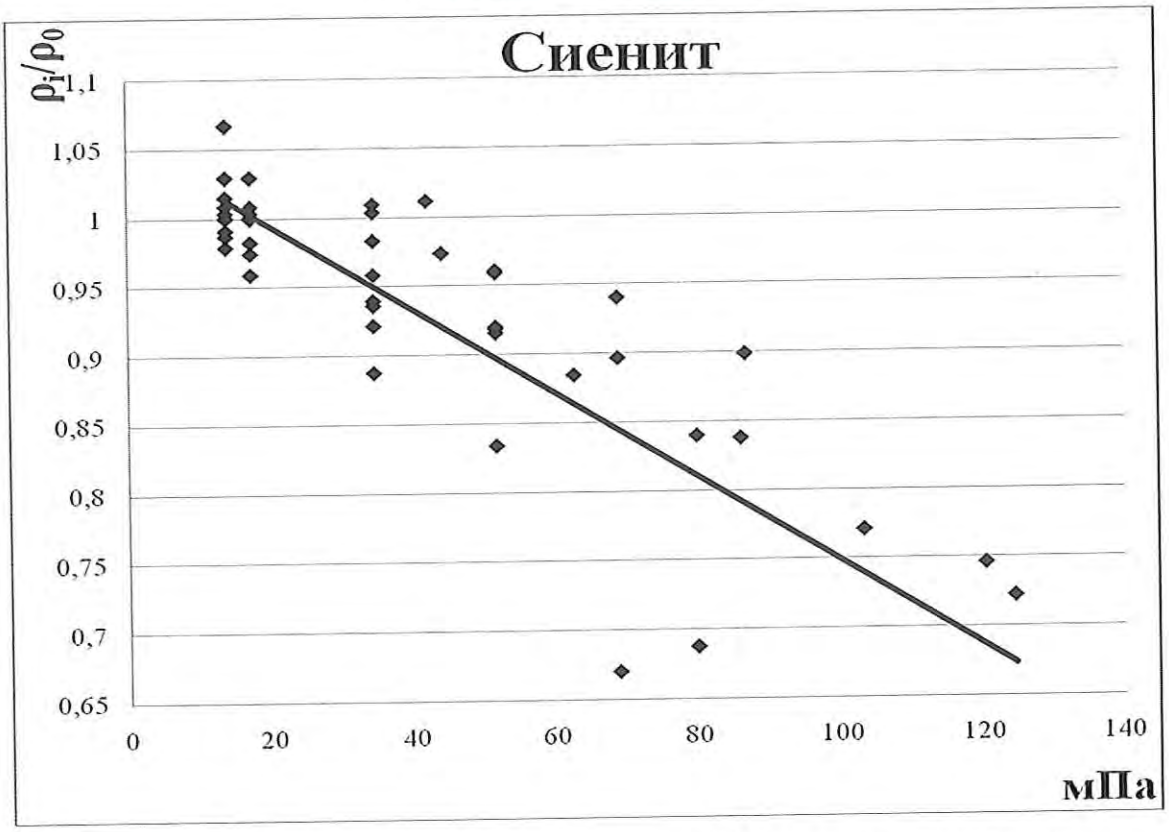


Рисунок 5.5 - Зависимость относительного УЭС от механических напряжений для сиенита

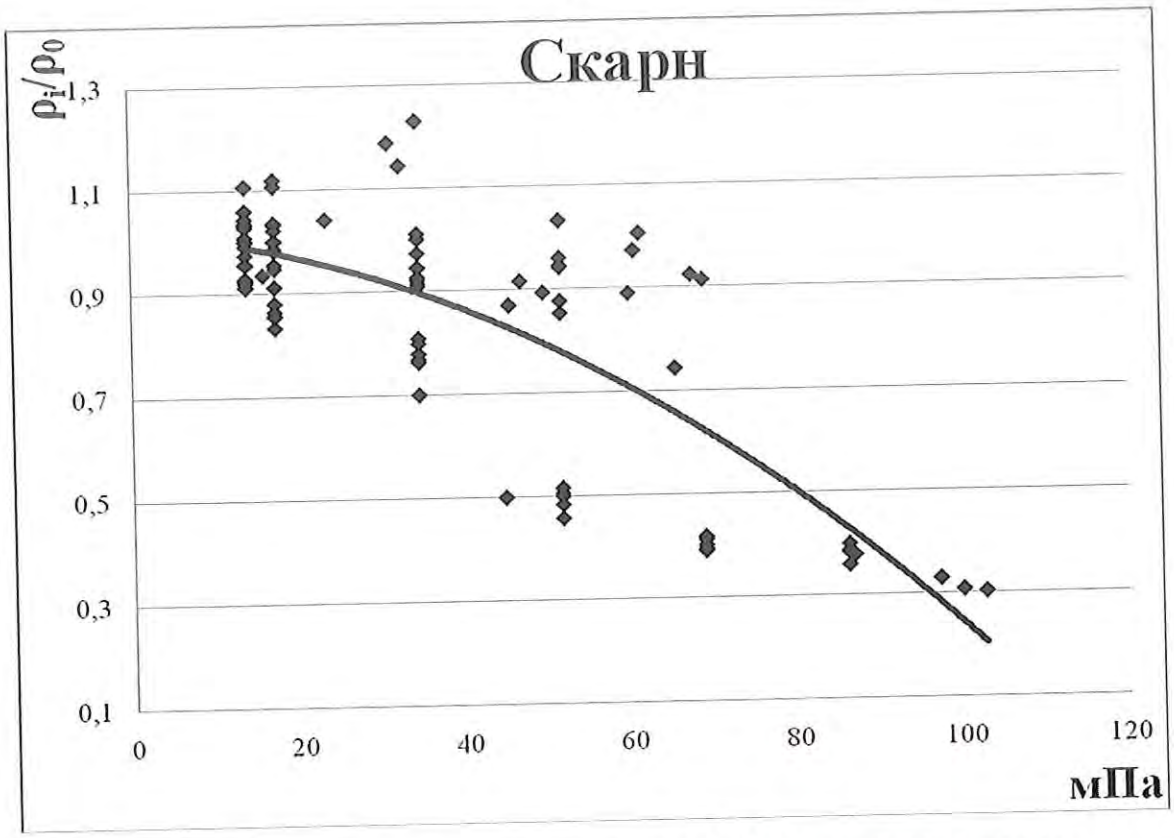


Рисунок 5.6 - Зависимость относительного УЭС от механических напряжений для скарна

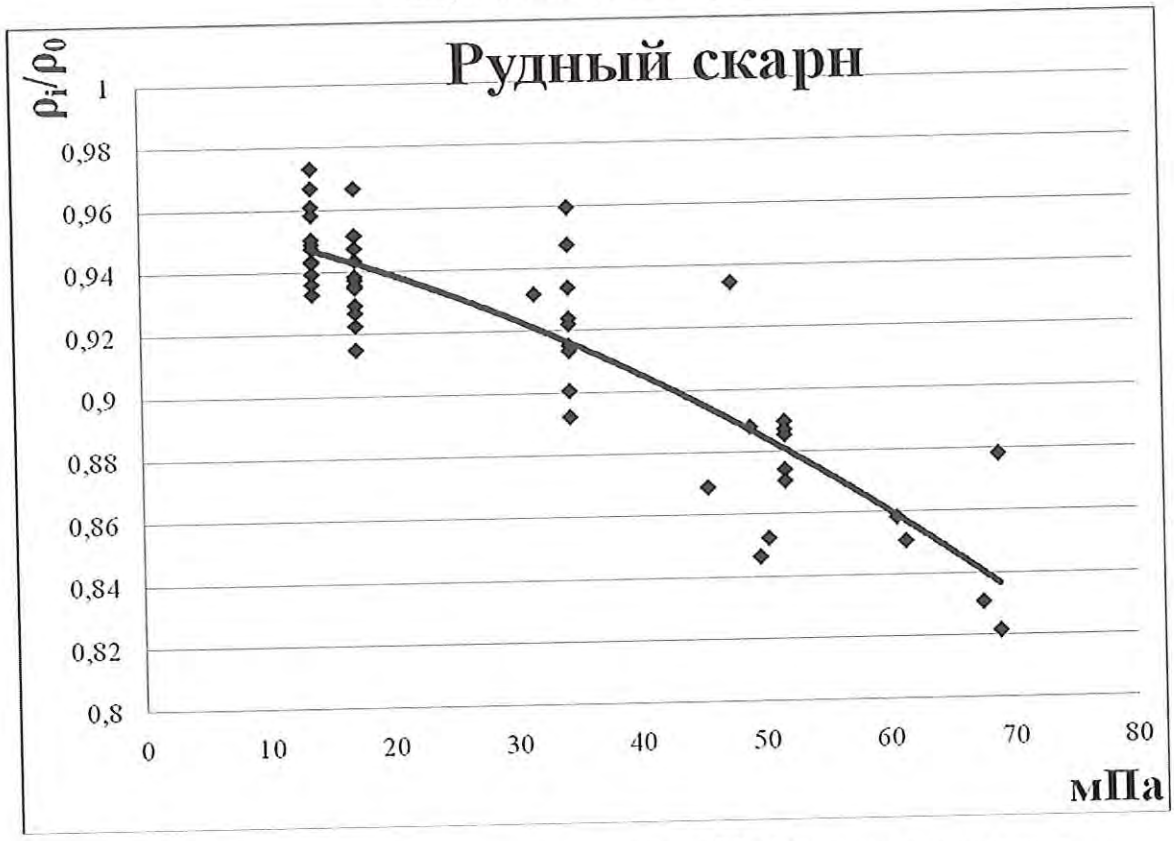


Рисунок 5.7 - Зависимость относительного УЭС от механических напряжений для рудного скарна

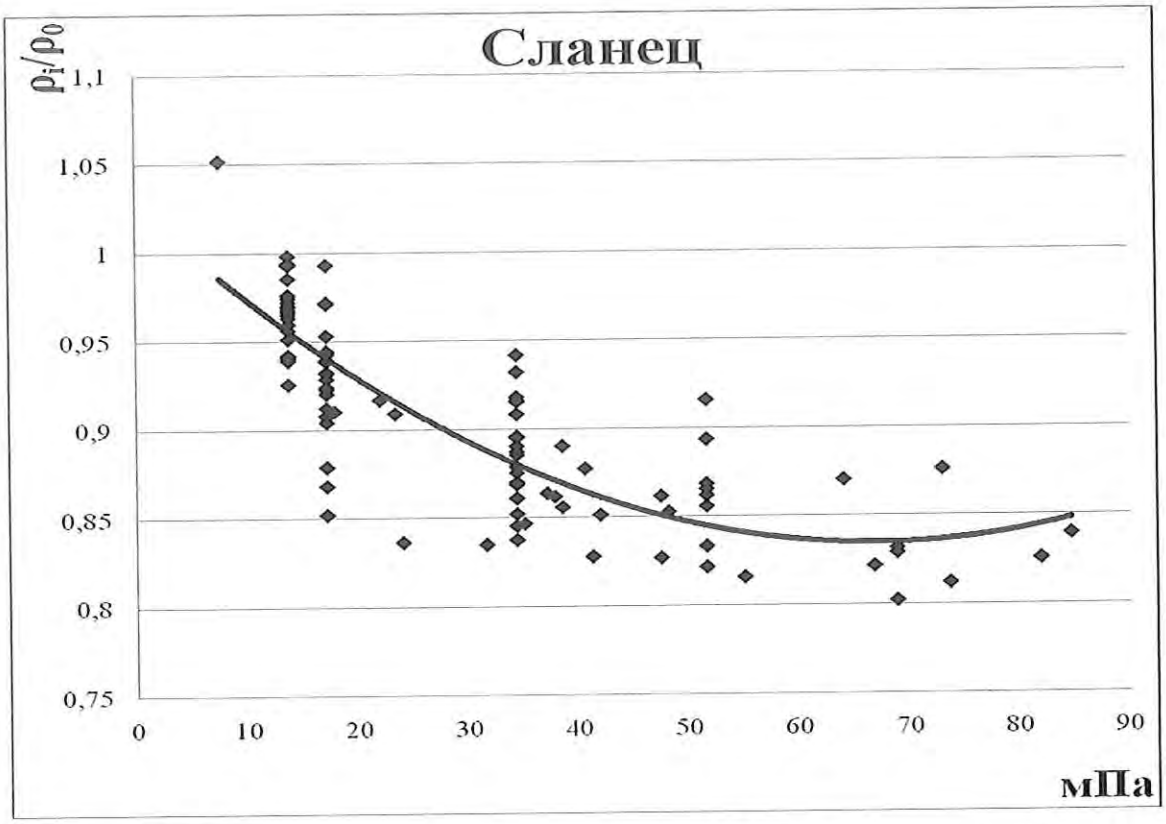


Рисунок 5.8 - Зависимость относительного УЭС от механических напряжений для сланца

В таблице 5.3 приведены функциональные зависимости относительного УЭС от механического напряжения для всех исследованных типов пород, полученных по результатам этой статистической обработки.

Таблица 5.3 - Функциональные зависимости относительного УЭС от механического напряжения

Тип горной породы	Уравнение	Корреляционное отношение
Кварцит	$y = 9E\text{-}06x^2 - 0{,}0034x + 1{,}0208$	0,93
Порфирит	$y = 3E\text{-}05x^2 - 0{,}0074x + 1{,}0077$	0,88
Магнетит	$y = 6E\text{-}05x^2 - 0{,}0034x + 0{,}9365$	0,77
Сиенит	$y = -0{,}0031x + 1{,}0552$	0,77
Скарн	$y = -6E\text{-}05x^2 - 0{,}0013x + 1{,}0198$	0,79
Рудный скарн	$y = -7E\text{-}06x^2 - 0{,}0005x + 0{,}9603$	0,88
Сланец	$y = 4E\text{-}05x^2 - 0{,}0057x + 1{,}0266$	0,84

В таблице 5.4 приведены изменения относительного электросопротивления от начала нагружения до предразрушающего состояния.

Таблица 5.4 - Изменения относительного электросопротивления от начала нагружения до предразрушающего состояния

Тип горной породы	Изменения относительного электросопротивления от начала нагружения до предразрушающего состояния, %	Возрастание или падение относительного электросопротивления
Кварцит	18	Падение
Порфирит	42	Падение
Магнетит	21	Возрастание
Сиенит	34	Падение
Скарн	80	Падение
Рудный скарн	11	Падение
Сланец	13	Падение

Изменение относительного электросопротивления от начала нагружения до предразрушающего состояния составляет от 11 до 80 %. Большинство зависимостей имеют параболический характер за исключением сиенита, имеющего линейную зависимость.

6 Исследование закономерностей изменения физико-химических и электрических свойств загрязненных грунтов при электроосмотической обработке

6.1 Анализ основных источников загрязнения грунтов в Кузбассе

При работе предприятий горно-, нефтедобывающей, перерабатывающей, атомно-энергетической, транспортной, оборонной отраслей происходит интенсивное загрязнение грунтов нефтесодержащими продуктами, радионуклидами, токсичными веществами. Загрязнение грунтов является одной из

наиболее существенных экологических проблем, потенциальной причиной техногенных катастроф.

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 (рисунок 6.1) [40].

В настоящее время в угольной промышленности Кузбасса действуют 62 шахты, 57 разрезов и 49 обогатительных фабрик и установок (рисунок 6.2). Их производственная мощность составляет 245 млн. тонн в год по добыче угля, а по переработке – 166 млн. тонн.[41]



Рисунок 6.1 - Распределение объема образования отходов по основным отраслям промышленности, %

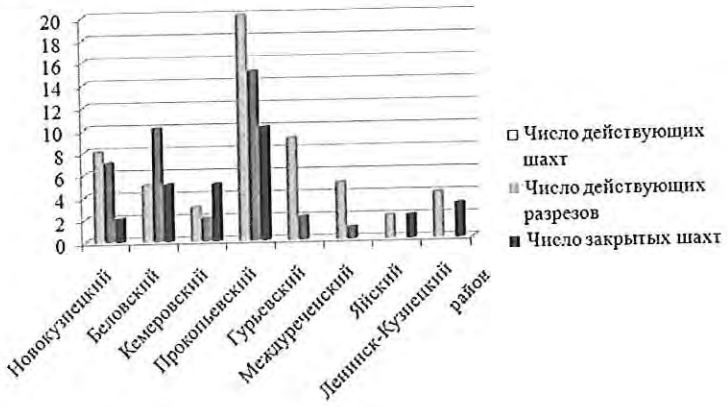


Рисунок 6.2 - Сведения о добыче угля по районам Кемеровской области

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 горно-добывающей и горно-перерабатывающей промышленности (особенно хвосто-хранилища, отстойники, отвалы, шламонакопители и т.п.), химической и металлургической промышленности, предприятия топливно-энергетического комплекса (прежде всего работающие на угле), военной, перерабатывающей и машиностроительной промышленности.

Основными источниками загрязнения грунтов на горнодобывающих и обогатительных предприятиях в Кузбассе являются (таблица 6.1):

- сооружения по очистке промышленных стоков и сточных вод (грунтовые фильтры);
- топливо-заправочные пункты;
- котельные и теплоэлектростанции;
- сухие и гидроотвалы;
- шламоотстойники обогатительных фабрик.

Таблица 6.1 - Количество источников загрязнения на примере угледобывающего предприятия ОАО «УК «Кузбассразрезуголь».

Разрез	Склады ГСМ	Котельные	Обогатительные фабрики / комплексы	Грунтовые фильтры	Шламоотстойники / гидроотвалы	Сухие отвалы
Кедровский	1	1	1/2	3	2/1	4
Моховский	3	3	-/2	1	2/2	7
Бачатский	2	1	2/1	-	2/-	4
Красно-бродский	3	5	1/2	2	2/-	9
Талдинский	3	3	-/1	1	1/1	11
Калтанский	2	2	-/-	5	2/-	7

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

сжигания образуется твердые отходы (шлак и зола), которые складируются и хранятся на поверхности грунта, что ведет к загрязнению грунта химическими элементами, содержащимися в золе и шлаке (рисунок 6.3). Содержание некоторых химических элементов в золошлаковых отходах превышают ПДК (рисунок 6.4) [42].

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 762,402 млн. куб. метров.

Суммарный объем образования отходов по городам области приведен на рисунок 6.5.

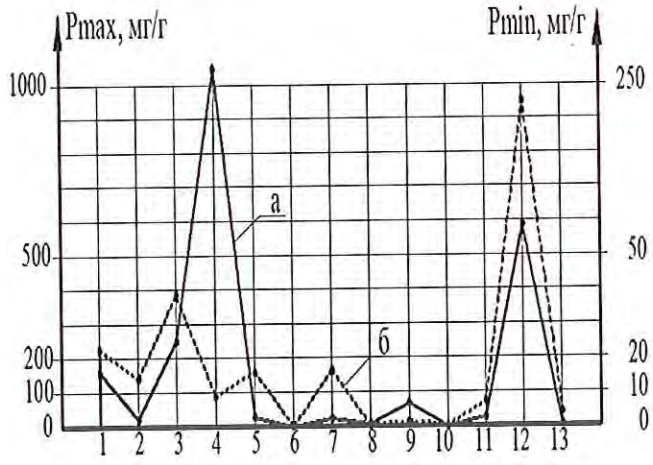


Рисунок 6.3 - Валовые содержания тяжелых металлов в золошлаковых отходах котельных Кемеровской области а – максимальное P_{max}, мг/г, б – минимальное P_{min}, мг/г:
1 – ванадий; 2 – медь; 3 – хром; 4 – свинец; 5 – цинк; 6 – кадмий; 7 – никель; 8 – ртуть; 9 – олово; 10 – сурьма; 11 – кобальт; 12 – марганец; 13 – молибден

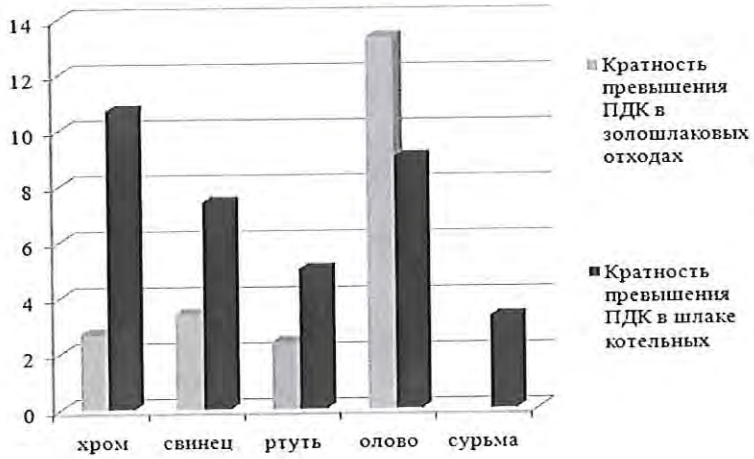


Рисунок 6.4 - Кратность превышения ПДК тяжелых металлов в валовой форме в золошлаковых отходах и шлаке котельных Кемеровской области

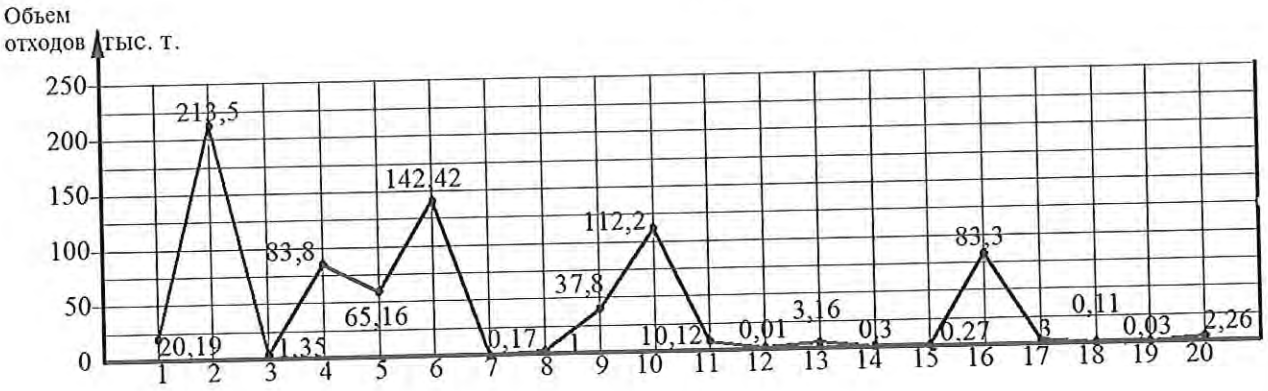


Рисунок 6.5 - Объем образования отходов по городам Кемеровской области, тыс.тонн:

1 – Новокузнецк; 2 – Белово; 3 – Ленинск-Кузнецкий; 4 – Кемерово; 5 – Мыски; 6 - Междуреченск; 7 – Осинники; 8 – Полысаево; 9 – Прокопьевск; 10 – Киселевск; 11 – Калтан; 12 - Юрга; 13 – Анжеро-Судженск; 14 – Мариинск; 15 – Топки; 16 – Березовский; 17 – Таштагол; 18 - Гурьевск; 19 – Тайга; 20 – Салаир

6.2 Физические основы контролируемой электрохимической очистки грунтов от нефтепродуктов

Из существующих методов и очистки грунтов от промышленных загрязнителей (рисунок 6.6), потенциально перспективным методом очистки является электрохимический метод. Отличительной особенностью метода является возможность его применения для очистки грунтов с низкой фильтрационной способностью непосредственно на месте загрязнения, без выемки и перемещения грунта.



Рисунок 6.6 - Классификация методов очистки загрязненных грунтов

Физической основой этого метода является электроосмотическое перемещение экотоксиканта, подчиняющееся уравнению Гельмгольца – Смолуховского:

$$\bar{V} = -\frac{\varepsilon\varsigma}{\mu} grad\varphi, \qquad (6.1)$$

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

На основе анализа размерностей получена зависимость для модуля эффективной скорости $V_{эф}$ (расхода):

$$V_{эф} = C\sigma_0 \frac{m^2 R}{\mu} E = \frac{m\varsigma\varepsilon}{\mu} E = K_Э E, \qquad (6.2)$$

где C - постоянная; σ_0- удельная объемная плотность зарядов ионов диффузного слоя, Кл/м^3; m - пористость грунта; R - гидравлический радиус пор, м; $K_Э$ - коэффициент электроосмотической активности, м^2/(В·с); E - напряженность поля, В/м.

Во время очистки загрязнения перемещаются вдоль силовых линий электрического поля, структура которых определяется расположением 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 мг/кг до 1-10 мг/кг, что вполне укладывается в существующие нормы.

Основными контролируемыми параметрами геоэлектрического метода являются: удельное электросопротивление (УЭС), диэлектрическая и магнитная проницаемость, электрическая прочность, потенциалы стационарных и нестационарных естественных электрических полей.

Эффективное УЭС влагонасыщенной горной породы, представляющей собой трехфазную среду, описывается эмпирической зависимостью [43]:

$$\rho_к = \frac{\alpha \kappa_п}{m^{\beta} W^{\gamma}} \rho_в, \qquad (6.3)$$

где m – пористость (поровая пустотность); W – коэффициент влагонасыщения пространства пор и трещин; $\rho_в$ – УЭС раствора, заполняющего поровое пространство, Ом·м; $\kappa_п$, α, β, γ – эмпирические параметры, зависящие от структурно-текстурных особенностей исследуемых грунтов (пород); $\kappa_п$ – 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.

В таблице 6.2 представлены расчетные значения параметров β и γ, полученные с использованием реальных диапазонов $\rho_к / \rho_в$ при геоконтроле увлажненных пород, а также усредненных значений физико-технических параметров $\overline{m}$ и $\overline{W}$ для глинистых грунтов Кузбасса, приведенных в работе [44], для основных видов глинистых грунтов.

Для дальнейшего анализа процесса электрохимической обработки загрязненных грунтов необходимы сведения о электрофизических и электрохимических свойствах природных водных растворов и жидкостей, содержащих загрязняющие вещества, насыщающих грунты. Проведены экспериментальные исследования электрических свойств растворов электролитов, содержащих нефтепродукты, с измерением на постоянном и переменном электрическом токе.

Таблица 6.2 - Прогнозные значения структурных параметров β и γ

Вид грунта		Параметр β								
		Супеси ($\overline{m} = 0{,}314$; $\overline{W} = 0{,}187$)			Суглинки ($\overline{m} = 0{,}296$; $\overline{W} = 0{,}227$)			Глины ($\overline{m} = 0{,}324$; $\overline{W} = 0{,}189$)		
Параметр γ		1,8	2,2	2,6	1,8	2,2	2,6	1,8	2,2	2,6
$\left(\frac{\overline{\rho_к}}{\rho_в}\right)$	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

На рисунке 6.7 представлены результаты измерений УЭС $\rho_э$ раствора NaCl в зависимости от концентрации соли в растворе и частоты переменного тока, а на рисунке 6.8 – аналогичные зависимости УЭС $\rho_н$ автомобильных масел и бензина. 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.

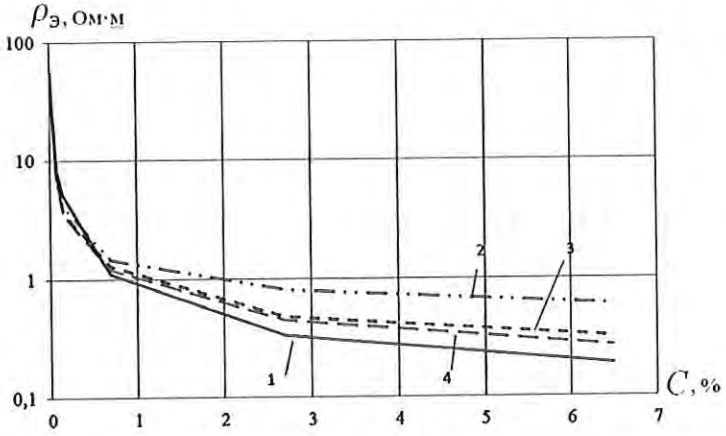


Рисунок 6.7 - Зависимость УЭС раствора $\rho_э$ от концентрации соли C в растворе:
1 –постоянный ток;
2 - переменный ток, f=10 Гц;
3 – 200 Гц;
4 - 1000 Гц

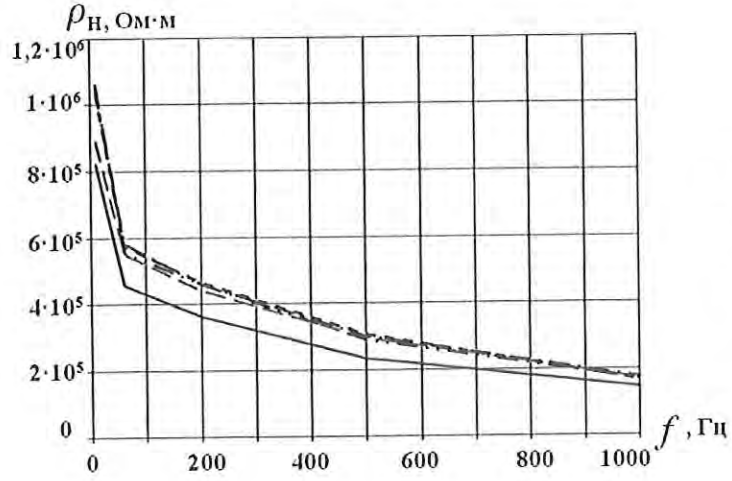


Рисунок 6.8 -. Зависимость УЭС $\rho_н$ моторного масла от частоты переменного тока:
····· - G-Energy F Synth 0W-40;
– – – - Mobil Synt S 5W-40;
— — - Shell Helix Ultra (отработанное);
— ·· - Shell Helix Ultra;
—— - бензин Аи-92

Поскольку формирование стабильной однородной водо-нефтяной суспензии весьма затруднительно, для дальнейшей теоретической оценки использовали зависимость логарифмического средневзвешенного для двухкомпонентной среды, позволяющего с большой достоверностью рассчитать искомое УЭС [45]:

$$\lg \rho_в = V_н \lg \rho_н + V_э \lg \rho_э, \qquad (6.4)$$

где $\rho_в$, $\rho_н$, $\rho_э$- УЭС соответственно средневзвешенного, нефтепродукта и электролита; $V_н$, $V_э$ – объем в растворе соответственно нефтепродукта и электролита.

Подстановкой в уравнение (6.4) данных рисунках 6.7, 6.8 получены зависимости средневзвешенных значений $\rho_в$ от относительного содержания

нефтепродуктов $V_н/V_э$ для постоянного (рисунок 6.9) и переменного (рисунок 6.10) токов.

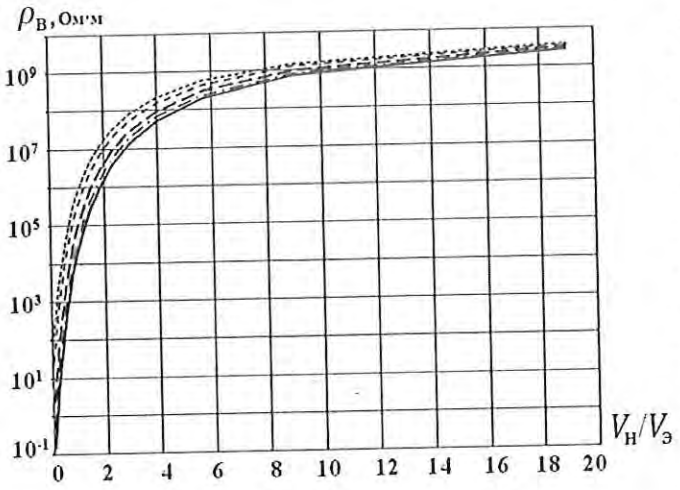


Рисунок 6.9 - Зависимость средневзвешенного значения $\rho_в$ от относительного содержания нефтепродуктов при измерении на постоянном токе

——— - насыщенный раствор;

— · — · - концентрация соли в растворе C = 50 г/л;

— — - C = 10 г/л;

– – – - C = 0,5 г/л;

····· - C = 0,1 г/л

а

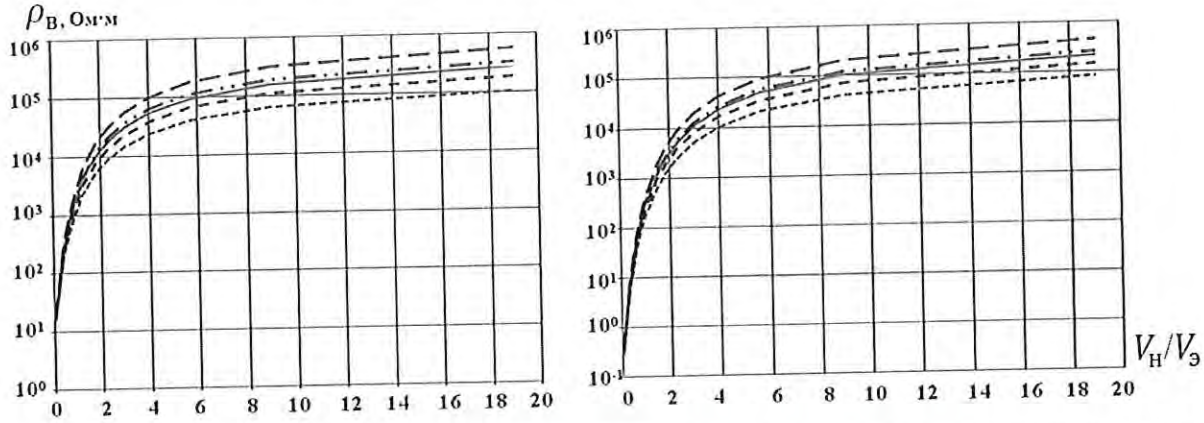


Рисунок 6.10 - УЭС средневзвешенного в зависимости от частоты переменного тока и концентрации соли в электролите C = 0,5 г/л (а); 50 г/л (б): — – - f= 10 Гц; — · — - 60 Гц; ——— - 200 Гц; – – – - 500 Гц; ····· - 1000 Гц

Для теоретической реализации зависимости (6.3) были сделаны следующие допущения. По данным исследований В. Н. Кобрановой [46] для песчано-глинистых отложений одного типа величина параметра α может быть принята равной 1. Параметр $\kappa_п$ поверхностной проводимости также может принят равным 1, т.к. при загрязнении нефтепродуктами вероятно образование малопроводящей нефтяной пленки на поверхности частиц твердой фазы грунта.

С учетом диапазонов структурных параметров β и γ, приведенных в таблице 6.2, рассчитаны зависимости изменения эффективного УЭС основных глинистых грунтов четвертичных отложений Кузбасса, частично представленные на рисунке 6.11.

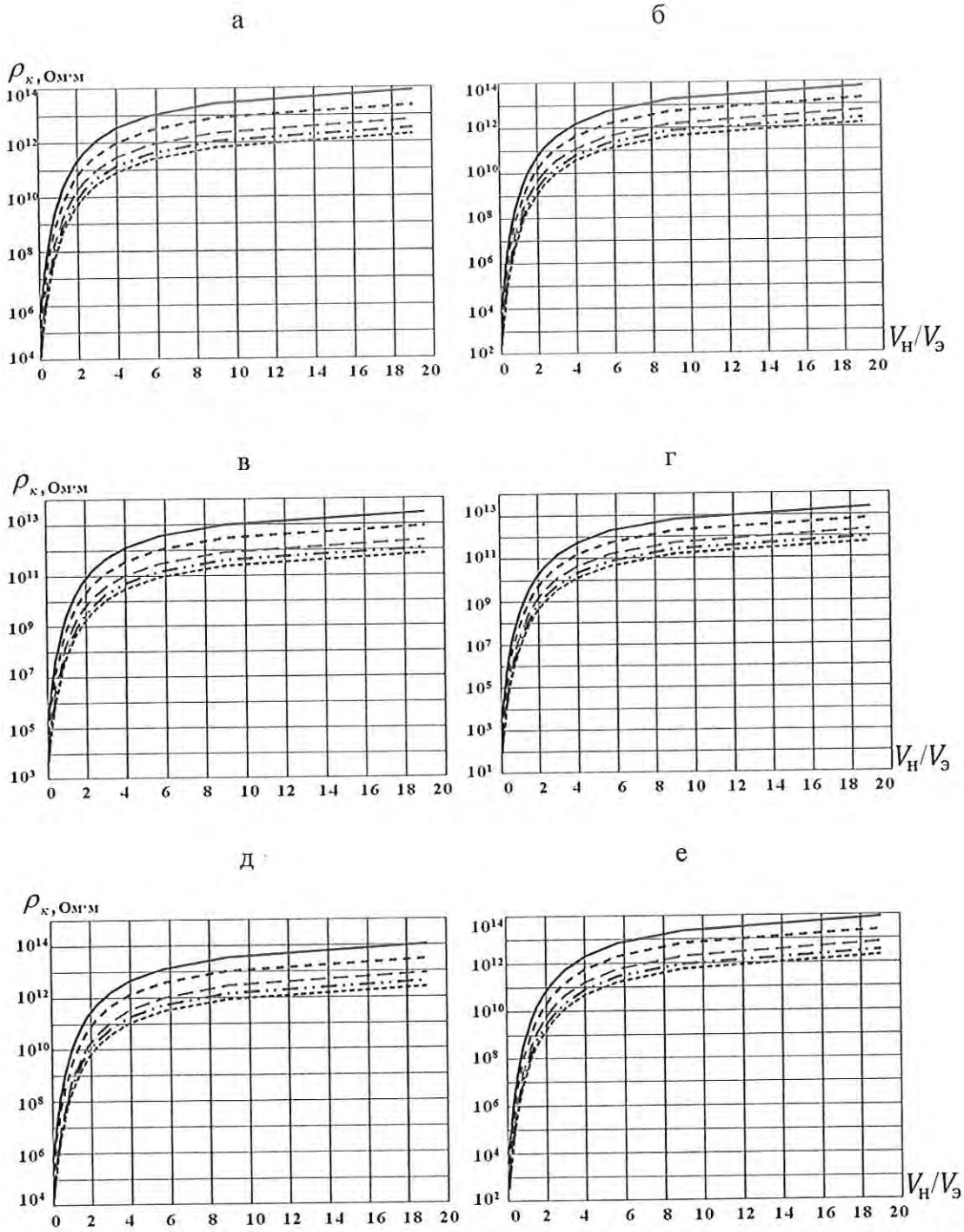


Рисунок 6.11 - Зависимости эффективного УЭС $\rho_к$ грунтов Кузбасса от коэффициента влагонасыщения пространства пор и трещин W, относительного содержания нефтепродукта в средневзвешенном $V_н/V_э$ и концентрации соли в электролите C, г/л:

супесей – C=0,5 (а), C=50 (б); суглинков - C=0,5 (в), C=50 (г);

глин - C=0,5 (д), C=50 (е):

—— - W = 0,1; – – · - W = 0,2; — — - W = 0,4; — · · - W = 0,6; ····· - W = 0,8

Приведенные зависимости позволили сформировать базу данных дл интерпретации результатов экспериментальных зондирований при контроле изменения отношения $V_н/V_э$ по величине $\rho_к$.

6.3 Способ оценки содержания нефтепродуктов в грунте

Предложенная в п. 6.2 методика реализована в среде Free Pascal (программный продукт Lazarus), алгоритм (блок-схема) компьютерной программы представлен на рисунок 6.12.

В первом блоке программы на основе измеренного УЭС пробы жидкости $\rho_{вп}$ с использованием зависимости (6.3), экспериментальных и справочных данных определяют оптимальные значения структурных параметров β и γ, при которых расчетные значения минимально отличаются от экспериментальных. Во втором блоке на основе полученных результатов с использованием зависимости (6.4) вычисляют степень загрязнения грунта.

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 восстановлению природной среды.

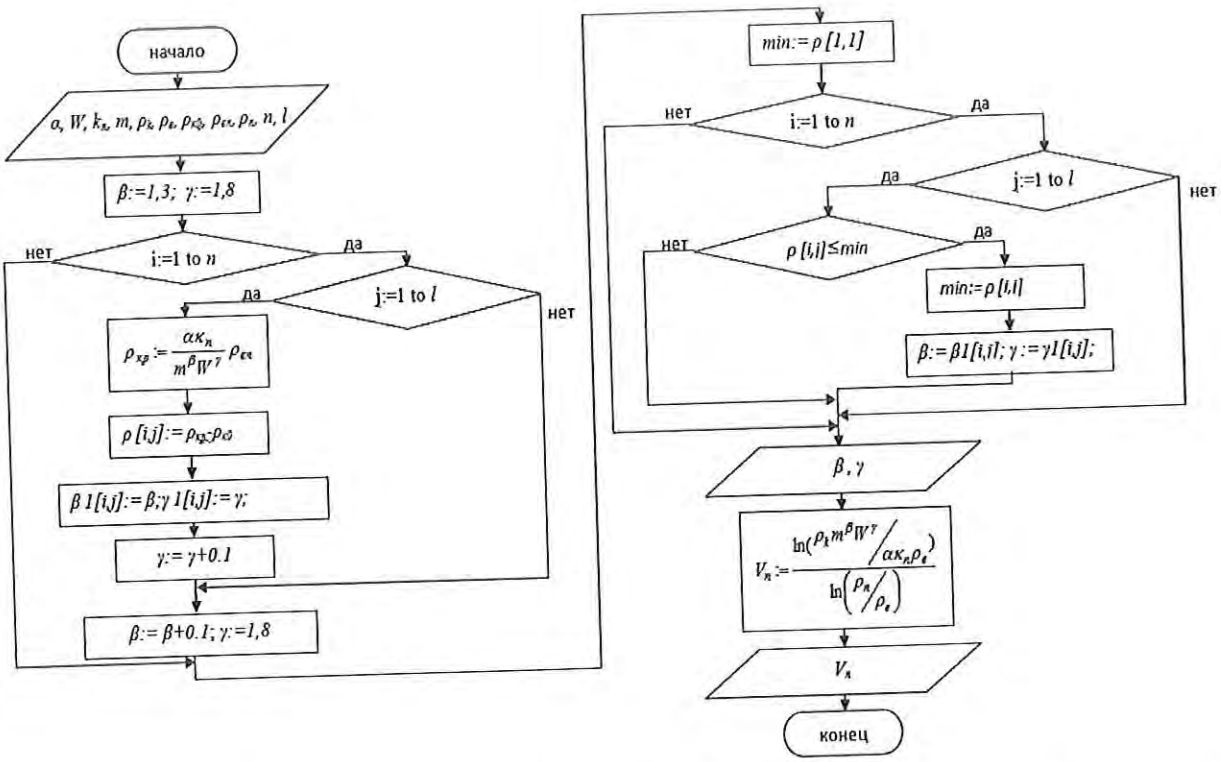


Рисунок 6.12 - Блок-схема расчета степени загрязнения грунта нефтепродуктами

ρ_e, $\rho_{к0}$, ρ_n – УЭС соответственно электролита, грунта вне загрязненной зоны, нефтепродукта; n и l – задаваемое количество циклов поиска оптимальных значений β и γ

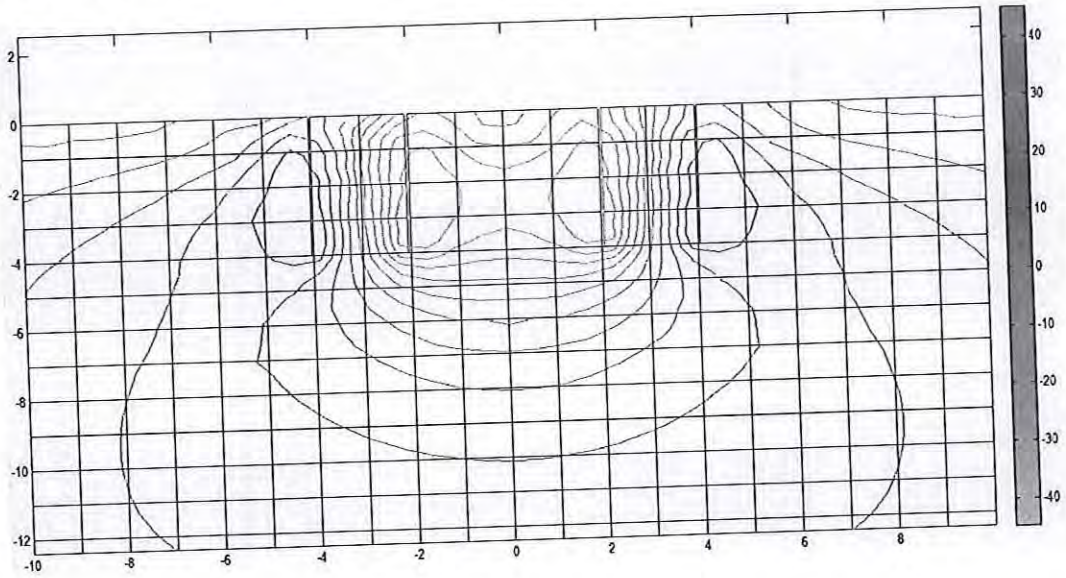
6.4 Влияние неоднородности при моделировании процесса электрохимической очистки грунтов

Для того чтобы оценить влияние неоднородности свойств моделируемого поля была разработана компьютерная модель электрокинетической ловушки, отличающаяся от аналогов тем, что поле, представляющее собой грунтовый массив с внедренными в него электродами-инъекторами задано не в виде целого объекта, а в виде совокупности блоков, каждый из которых может обладать индивидуальными свойствами.

Для оценки влияния блочной структуры модели на результаты проведено сравнение двух моделей установок с одинаковыми параметрами. Результат моделирования приведен на рисунок 6.13.

Сравнение двух моделей показывает, что введение блочной структуры не оказывает влияния на характер изолиний потенциала, переход к такой структуре модели вполне оправдан.

а



б

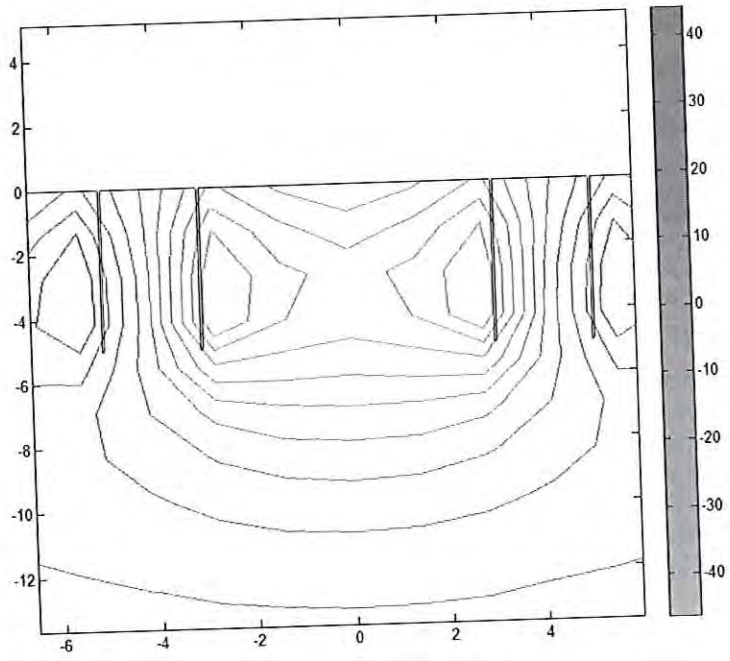


Рисунок 6.13 - Изолинии потенциала поля φ при блочной (а) и однородной (б) структуре модели

Обоснование геометрических параметров модели

Рассмотрена модель электрокинетической ловушки со следующими параметрами:

- расположение электродов-инъекторов рядовое;
- расстояния между электродами в ряду «анод-катод» 2 м, в ряду «анод-анод» 4 м;
- подаваемое на электроды напряжение 50 В;
- глубина заложения электродов 4 м;
- диаметр электродов принимался равным 0,05 м.

Размеры пространства ограничивались прямоугольником 40×20 м. При задании граничных условий в ограниченном пространстве возникают погрешности. Эти погрешности можно уменьшить, отодвинув границы области моделирования от установки. Для проверки существенности погрешности постановки краевой задачи, границы области моделирования отодвигают на значительное расстояние. Если результат расчета при этом не изменится, значит, рассматриваемый вид погрешностей не играет большой роли.

При определении размера составляющего блока выяснилось, что программа ограничена в ресурсах, и задать блочной структурой достаточно большое пространство не представляется возможным. К тому же, при задании блока с размерами менее 0,5×0,5 м сопряжено со значительным увеличением времени построения самой модели. Так при размере блока 0,05×0,05 м время, с которым программа способна построить геометрию модели, оценивалось приблизительно в 16 часов. Опытным путем было определено, что при размере блока 1×1 м программа способна достаточно быстро (порядка 20 мин.) сгенерировать модель.

Влияние неоднородности свойств поля

При подобном (блочном) построении пространства в Matlab границы блоков сливаются, образуя единый массив, при этом задавать граничные условия для каждого блока не представляется возможным. Изменяемым параметром в таком случае становится диэлектрическая проницаемость ε, задаваемая программно для каждого блока и охватывающая все пространство блока.

Для оценки влияния неоднородности сгенерировали модель и задали однородное пространство с относительной диэлектрической проницаемостью равной 10, что по значению соответствует суглинкам, рисунок 6.14.

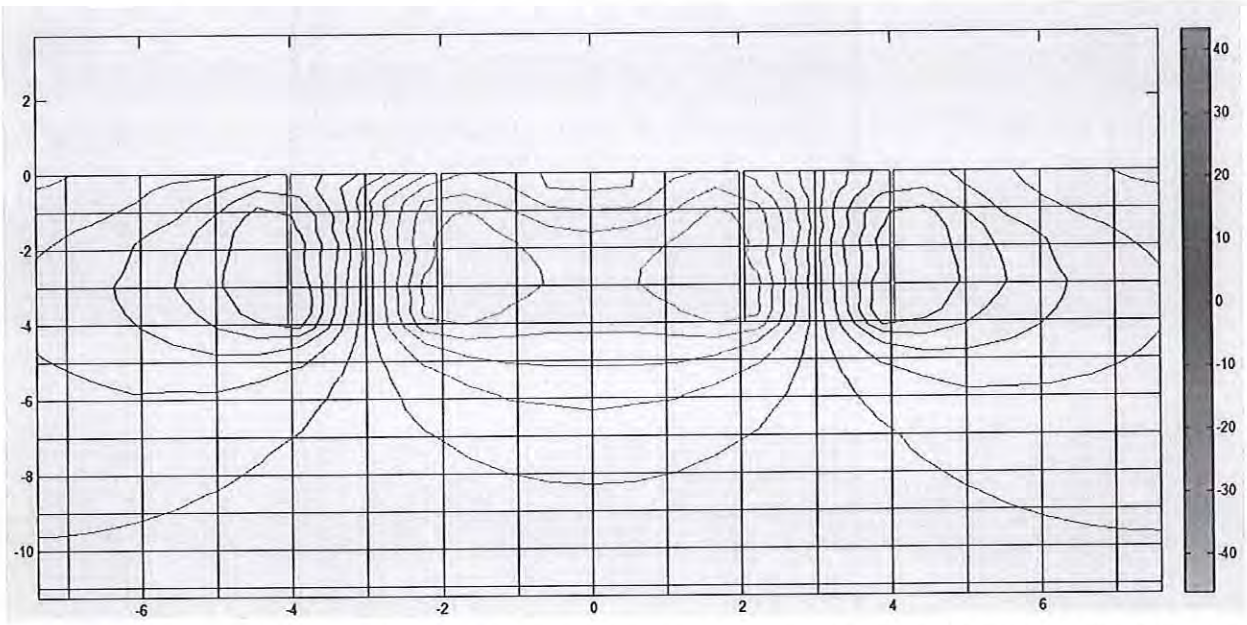


Рисунок 6.14 - Изолинии потенциала поля φ при блочной структуре модели с однородными условиями

Далее на глубину равную глубине заложения электродов вводим значение ε равное 19, что соответствует влажной глине. В результате получаем двухслойную среду, рисунок 6.15.

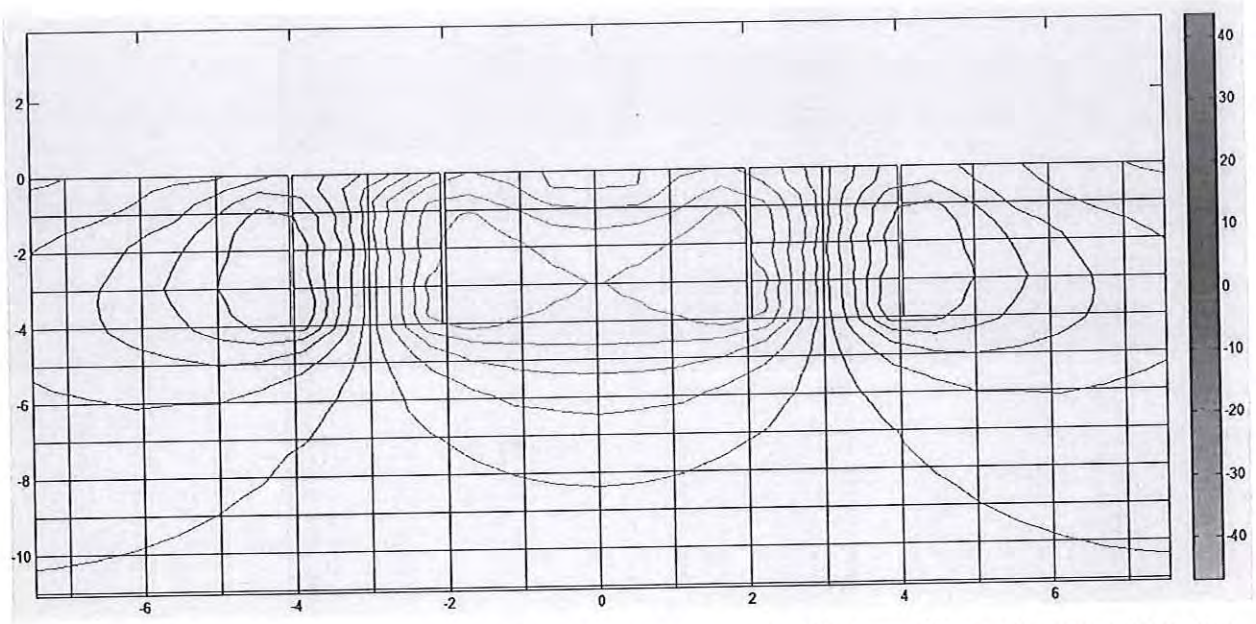


Рис 6.15 - Изолинии потенциала поля φ при блочной структуре модели с горизонтальной двухслойной средой

Наблюдаем смещение изолиний потенциала к центру установки, что указывает на несомненное влияние наличия второго слоя.

Следующий эксперимент направлен на проверку влияния вертикальной неоднородности. Для этого среду разделили пополам и задали оной части значение ε равное 10, другой - 19, рисунок 6.16.

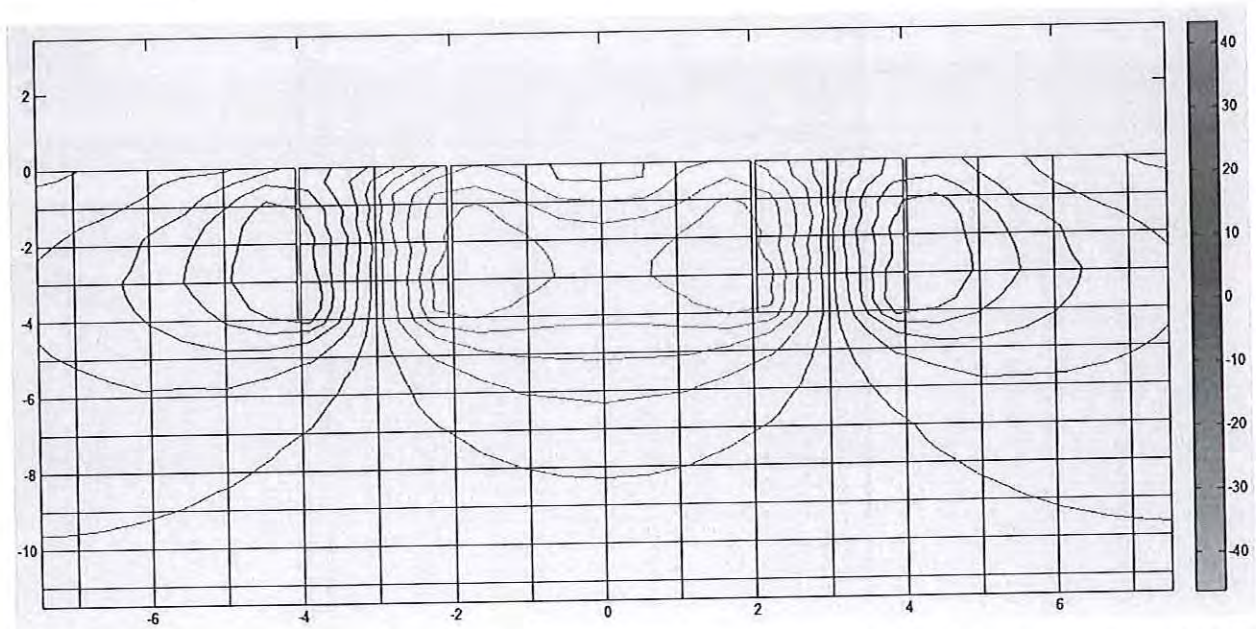


Рисунок 6.16 - Изолинии потенциала поля φ при блочной структуре модели с вертикальной двухслойной средой

Наблюдаем небольшую асимметрию относительно центра установки. Затем смещаем слой глины (ε=19) в сторону уменьшения слоя, рисунок 6.17. Наблюдаем усиление асимметрии.

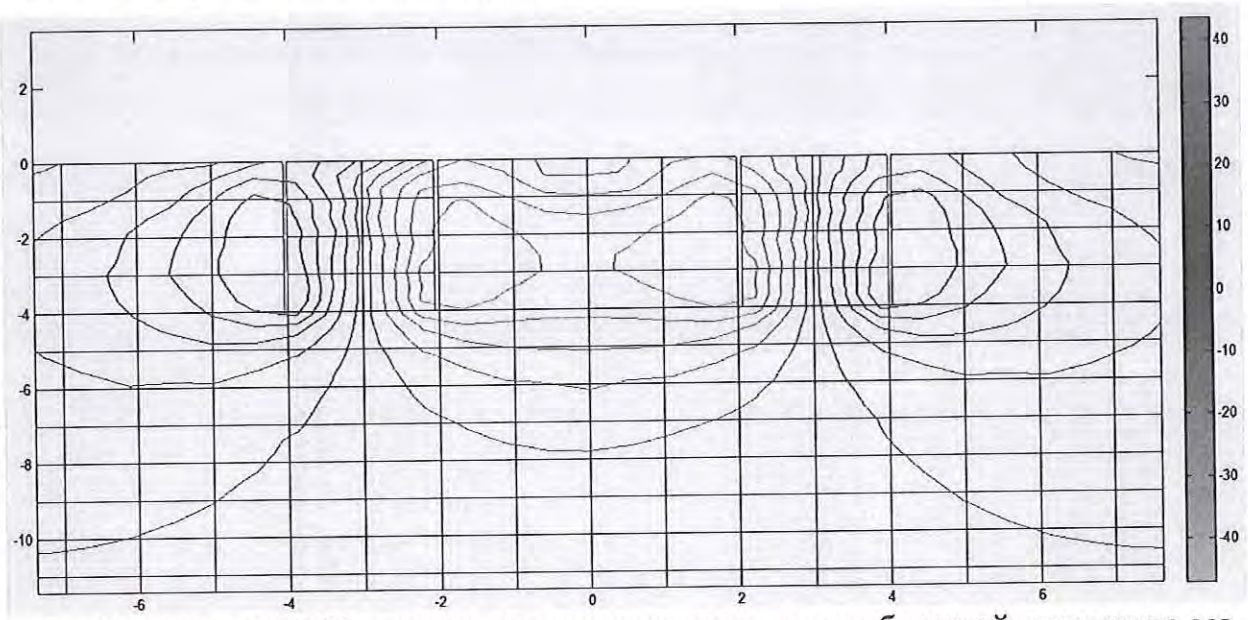


Рисунок 6.17 Изолинии потенциала поля φ при блочной структуре модели с вертикальной двухслойной средой

Рассмотрим влияние ***нестационарности*** на модель. В качестве модели использовали электрокинетическую ловушку и рассмотрели один из аспектов электроосмотического процесса – высыхание грунта в зоне электродов. Связан этот процесс собственно с перемещением влаги, а также с нагреванием электродов под действием электрического тока. Для этого сделаем несколько допущений:

- меняются свойства только в исследуемой зоне, по всему остальному массиву свойства не меняются;

- для придания контрастности в исследуемой зоне сравниваются свойства сухой и влажной глины.

Придаем всей зоне свойства влажной глины (ε=19), рисунок 6.18.

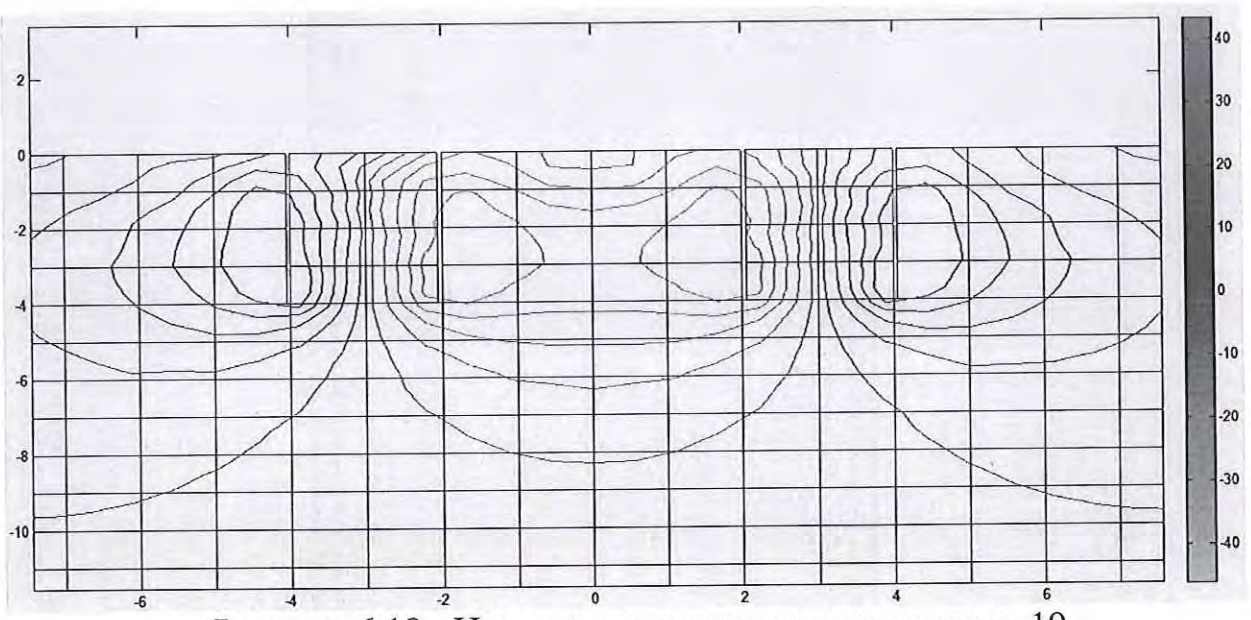


Рисунок 6.18 - Изолинии потенциала поля φ при ε=19

Придаем зоне вокруг электродов свойства увлажненной глины (ε=7), затем понижаем ε с шагом в 1 до значения сухой глины (ε=2). Результаты приведены на рисунок 6.19.

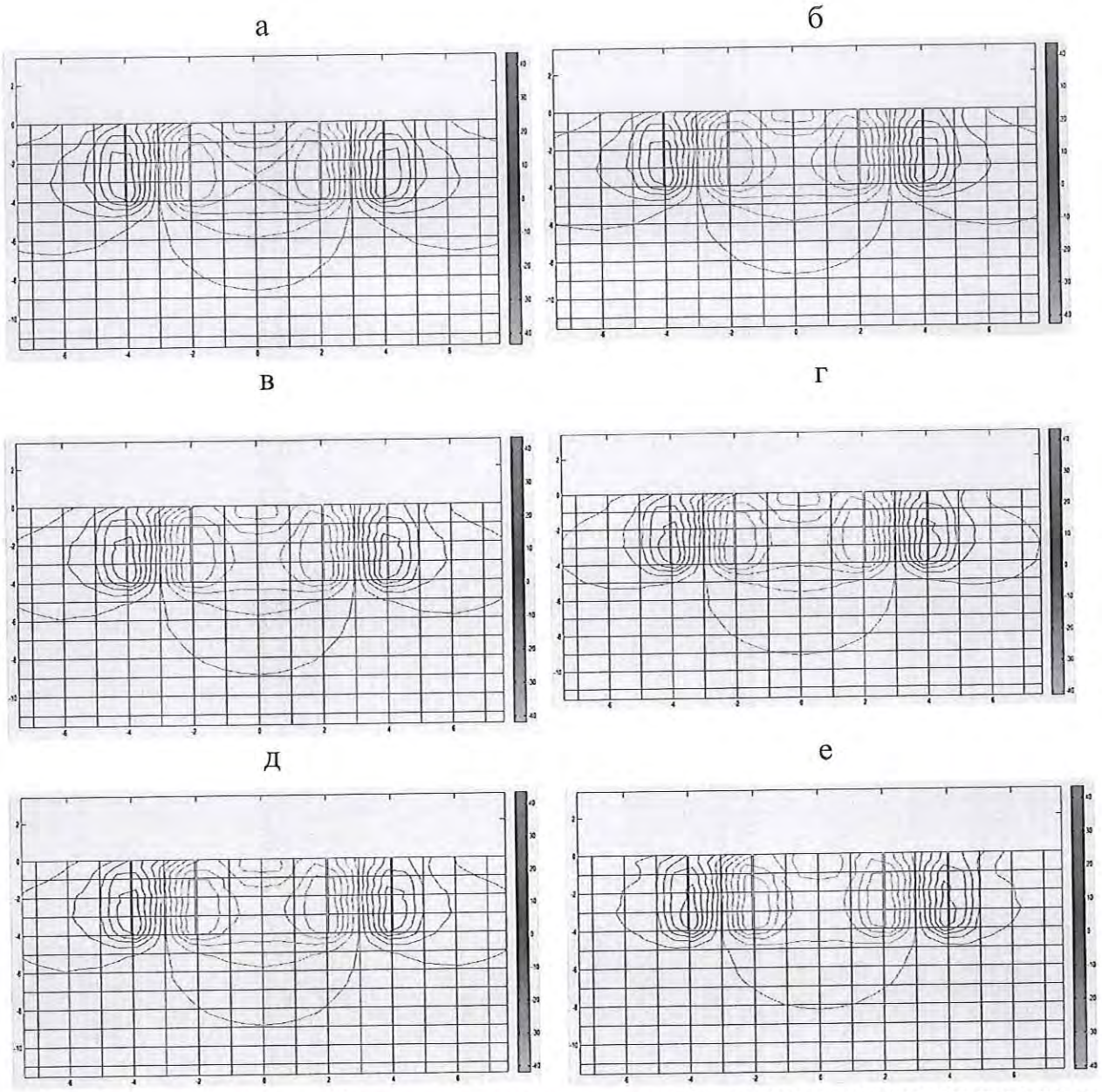


Рисунок 6.19 - Изолинии потенциала поля φ при высыхании грунта в приэлектродной зоне

Для оценки неравномерности электроосмотической фильтрации, обусловленной влиянием неоднородности модели, были построены графики изменения относительной скорости фильтрации $V/K_э$ в горизонтальном сечении на глубине 2/3 глубины заложения электрода в зависимости от расстояния до отрицательного электрода (рисунок 6.20)

$$\frac{V(x;y;z)}{K_э} = E(x;y;z)$$

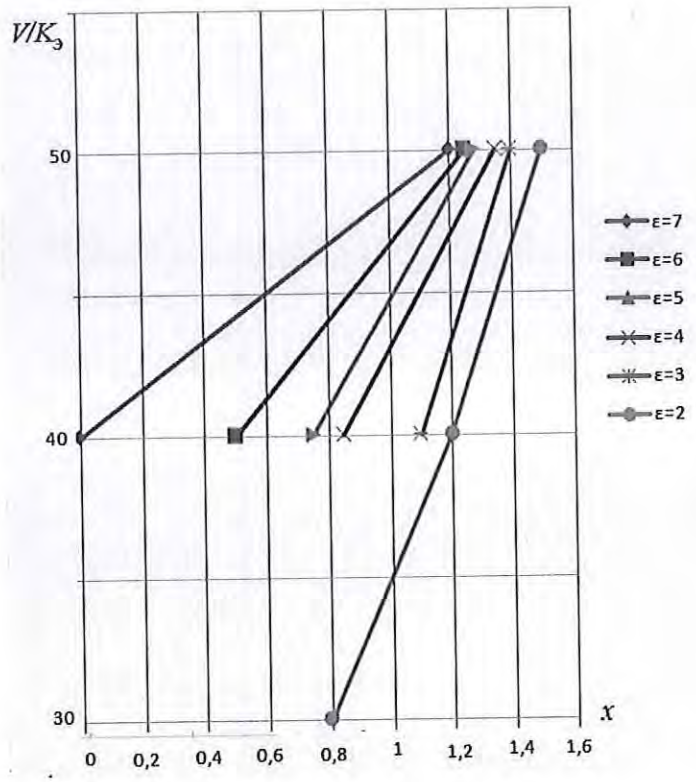


Рисунок 6.20 - Графики $V/K_э$ в горизонтальном сечении

Из графиков видно, что по мере высыхания грунта вокруг электродов зона активного электроосмоса сужается и уплотняется в приэлектродном пространстве.

Следующий эксперимент направлен на обратный процесс и представляет собой имитацию работы электрокинетической ловушки. В модели кроме допущений предыдущего случая задействованы следующие:

- для имитации процесса электроосмоса в межэлектродном пространстве осушение происходит на катоде, на аноде свойства не меняются (ε=7) вследствие работы ловушки и накопления загрязнителя в зоне «анод-анод»;

- накопление загрязнителя имитируется увеличением ε, что будет соответствовать увеличению влажности грунта.

Характерные результаты представлены на рисунок 6.21.

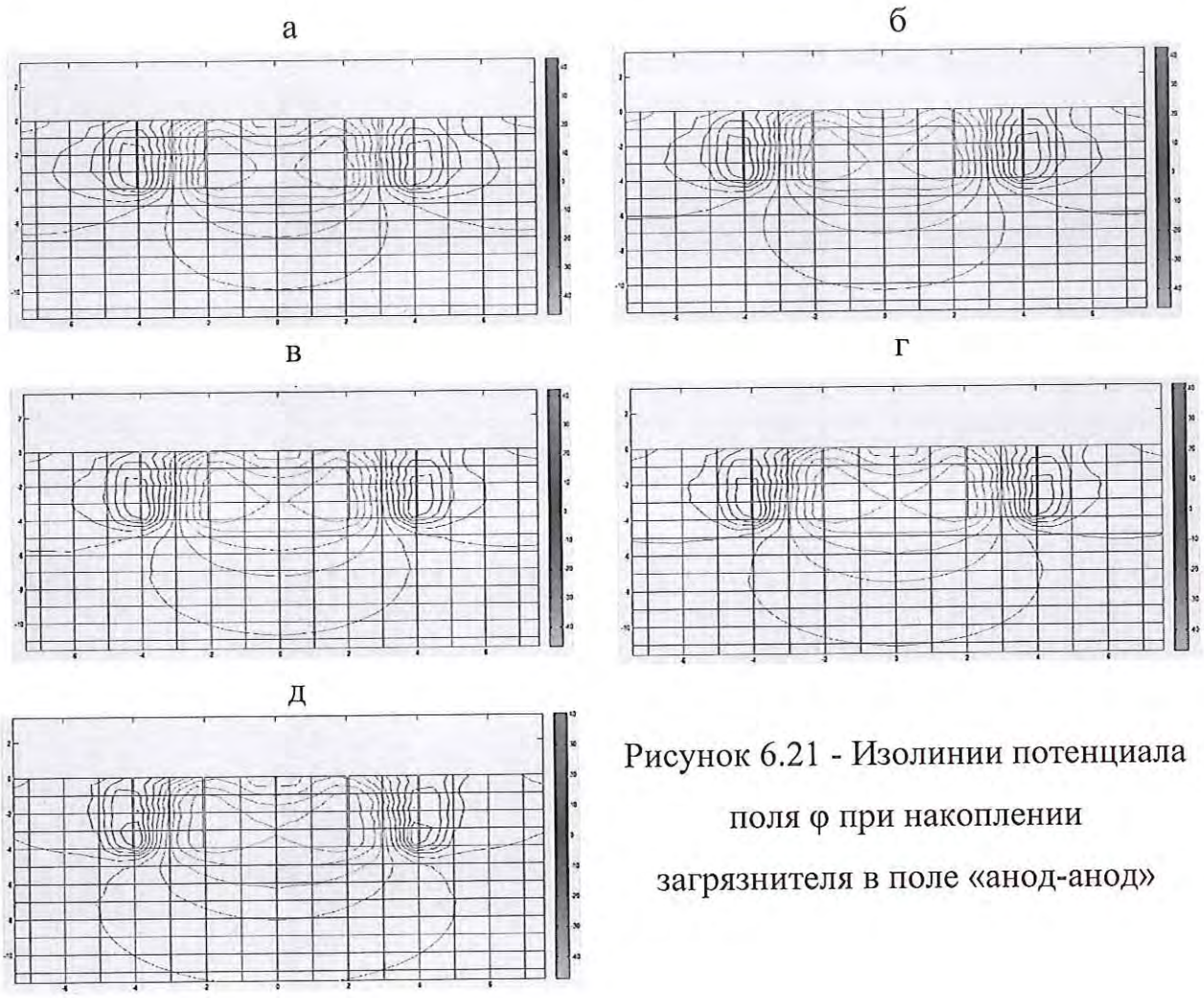


Рисунок 6.21 - Изолинии потенциала поля φ при накоплении загрязнителя в поле «анод-анод»

По характеру изменений в расположении изолиний потенциала можно судить об изменениях в зоне активного электроосмоса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный отчет является результатом выполнения НИР «Обоснование технологий прогноза и ликвидации природных и техногенных катастроф при разработке метаноугольных и железорудных месторождений Кузбасса»

Результаты исследований позволяют сделать следующие обобщения.

1Получена карта-схема блоковых структур 2 ранга площади Ерунаковского геолого-экономического района. Показана расчлененность Колмогоровского блока блоками 3 ранга.

Показано, что очаг сейсмического события (очаговая зона) – это некоторая объемная область горных пород, окружающая место зарождающегося разрыва и соответствующая зоне необратимых деформаций и максимальных перепадов механических напряжений; а эффективный очаг сейсмического события – это объемная область горных пород, включающая собственно очаг, а также зону возможных афтершоков.

Значение величины потенциала ЕЭП для четырёхслойного пространства превосходит аналогичное значение потенциала для трехслойного пространства при $K_1 \in [0{,}0;\ 0{,}9]$, а для $K_1 \in [0{,}9;\ 1{,}0]$ наоборот.

Влияние угольного пласта мощностью 1 метр пренебрежимо мало для $K_1 \in [0{,}0;\ 0{,}9]$ и поэтому применять более сложную модель нет необходимости. Если же $K_1 \in [0{,}9;\ 1{,}0]$, то угольный слой мощностью уже 1 метр существенно влияет на значение потенциала, при этом использование более простой трехслойной модели приведет к завышенным значениям потенциала.

Обнаружены линейная взаимосвязь между глубиной залегания очаговой зоны разрушения и величиной Δ_E и параболическая взаимосвязь между величиной Δ_φ и максимальным продольным размером очаговой зоны.

Установлено, что распределение потенциала ЕЭП на земной поверхности над зоной концентраций механических напряжений обладает симметричной структурой; при этом наибольшие величины перепадов потенциала ЕЭП обнаруживаются в области наименьшего расстояния между зоной концен-

траций механических напряжений и земной поверхностью; величина потенциала на наиболее продолжительной стадии может достигать величины от 1,0 до 35,0 (мВ).

Предложена новая, альтернативная известной формуле С. Н. Журкова, закономерность для длительной прочности геоматериалов, показательного типа.

Для раствора без добавок зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига близка к линейной. Добавка хлористого кальция незначительно влияет на величину вязкости, однако у такого раствора наблюдается рост вязкости при увеличении скорости сдвига. Раствор с добавкой жидкого стекла имеет выраженные псевдопластичные свойства и гораздо более высокое значение коэффициента эффективной вязкости.

Введение в тампонажные растворы на основе цемента золы сжигания отходов углеобогащения оказывает различное влияние на его реологические свойства. Основными факторами при этом являются тип и количество добавляемой золы. Максимальный эффект оказывает зола сжигания водоугольного топлива, добавка которой приводит к резкому возрастанию эффективной вязкости и значительному отличию характера течения такого раствора от характера течения раствора без добавок. Так раствор с концентрацией золы 20 % с В:Т =1:1 при скорости сдвига 39,6 с-1имеет значение коэффициента эффективной вязкости в три раза выше, чем у раствора без добавки. Зола гидроотвала наоборот – даже при высоких концентрациях уменьшает вязкость растворов. Наименьшее влияние на реологические свойства оказывает сухая зола-уноса. Раствор с концентрацией сухой золы до 50 % практически не отличаются по своим характеристикам от чистого цементного раствора.

Добавка хлористого кальция незначительно влияет на величину вязкости. Жидкое стекло увеличивает вязкость растворов, причем степень влияния различна и зависит от вида и количества добавленной золы. Общим для таких растворов является псевдопластичный характер течения. Жидкое стекло практически не реагирует с сухой золой-уноса и золой гидроотвала, поэтому вязкость таких растворов определяется количеством цемента. Реологические

свойства растворов с концентрацией золы-уноса 50 % и более практически не отличаются от свойств этих же растворов без добавки жидкого стекла и близки со свойствами чистого цементного раствора.

Добавление золы в тампонажный раствор приводит к снижению прочности цементного камня, полученного из такого раствора. Помимо этого сухая зола-уноса увеличивает выход тампонажного камня. Добавка хлористого кальция к цементному раствору без золы увеличивает прочность на 30 %. С увеличением содержания золы эффект снижается. Добавка жидкого стекла наиболее эффективно действует на повышение стабильности растворов. Но при этом происходит значительное снижение прочности тампонажного камня.

В целом, результаты выполненных исследований реологических характеристик и прочности тампонажного камня растворов с добавлением сухой золы уноса, золы гидроотвала и золы сжигания водоугольного топлива с введением химических добавок в виде жидкого стекла и хлористого кальция показывают, что такие растворы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к тампонажным растворам. Учитывая также экономичность замены цемента золой можно сделать вывод о перспективности применения таких растворов. При этом особое внимание следует обратить на перспективность безотходной технологии приготовления и сжигания водоугольного топлива из отходов углеобогащения с последующим использованием отходов сжигания при приготовлении тампонажных растворов.

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

Для диагностики геометрических параметров загрязненных зон и контроля распространения экотоксиканта целесообразно развитие методов электроразведки и геоэлектрики на постоянном и переменном токе, что позволяет повысить точность контроля, применить как контактные, так и бесконтакт-

ные и бесскважинные методы измерений.

Установленные зависимости и диапазоны изменения электрофизических параметров пород и грунтов в зависимости от УЭС загрязняющего раствора позволяют перейти к разработке способов и методик контроля процесса электрохимической очистки загрязненных грунтов

Предложена методика оценки степени загрязнения грунта, позволяющая оперативно оценить степень загрязнения грунта нефтью или нефтепродуктами, обосновать рекомендации для принятия решений по выбору оптимальных параметров технологии очистки нефтезагрязненных грунтов и восстановлению природной среды.

Анализ результатов компьютерного моделирования позволяет сделать следующие выводы.

1. Влияние неоднородности в значительной степени меняет картину модели. Следует учитывать вид неоднородности, расположение и направленность (вертикальная, горизонтальная, слоями, включениями и т.д.).

2. Влияние нестационарности процесса в моделировании можно учесть, следуя принципу, что нестационарный процесс можно рассматривать как совокупность стационарных в каждое мгновение времени.

3. В ходе моделирования неизбежно возникают погрешности.

- При постановке краевой задачи возникают погрешности, источником которых являются граничные условия. Можно снизить величину погрешности, отодвинув границы области моделирования от исследуемой зоны. Для проверки существенности такой, границы области моделирования отодвигают на достаточно большое расстояние. Если результат расчета не изменился, то погрешность не имеет большого влияния.

- В процессе решения поставленных задач возникает погрешность при использовании итерационного метода и количество итераций мало для достижения сходимости. Устранение этих погрешностей достигается проведением расчета с существенно большим числом итераций, которое зачастую задается не непосредственно, а с помощью какого-либо критерия сходимости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Reid, H. F. The California earthquake of April 18 1906, v. 2. The mechanics of the earthquake [Text] / H.F. Reid, –The CIW, 1910.

2. Benioff, H. Earthquakes and rock creep [Text] / H. Benioff, – Bull. Seismol. Soc. America, –1951, v.41, n. 1

3. Bullen, K. E. On strain energy and strength in the Earth's upper mantle [Text] / K. E. Bullen, – Trans. Amer. Geophys. Union, 1953, v. 34, n. 1.

4. Bath, M., Benioff H. The aftershock sequence of the Kamchatka earthquake of Nov. 4 1952 [Text] / M. Bath, H. Benioff, – Bull. Seismol. Soc. America, 1958, v. 48, n. 1.

5. Bath, M., Duda S. Earthquake volume, fault plane area, seismic energy, strain, deformation and related quantities [Text] / M. Bath, S. Duda, – Ann.geofis.1964, v. 17, n. 3.

6. Nakano, H. Notes on the natureof the forces which gave rise the earthquake motions [Text] / H. Nakano, – Seismol. Bull. Centr. Meteorol. Obs. Japan. 1923, n.1.

7. Byerly, P. Nature of faulting as deduced from seismograms. In "Crust of the Earth" [Text] / P. Byerly, – Baltimor, 1955.

8. Hodgson, J. H. Nature of faulting in large earthquakes [Text] / J. H. Hodjson, – Bull. Geol. soc. America. 1957, v.68, n. 5.

9. Honda, H. The elastic waves generated from a spherical source [Text] / H. Honda, – Sci. Pept. Tohoku Univ. Ser. 5. Geophys., 1959, v. 11, n. 3.

10. Кейлис-Борок, В. И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений [Текст]// Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1950, № 9.

11. Введенская, А. В. Определение полей смещения при землетрясениях с помощью теории дислокаций [Текст] // Изв. АН СССР, серия геофиз., 1956, № 3.

12. Костров, Б. В. Механика очага тектонического землетрясения [Текст] / Б. В. Костров – М.: Наука, 1975. – 176 с.

13. Мячкин, В. И. Основы физики очага и предвестники землетрясения [Текст] / В. И. Мячкин, Б. В. Костров, Г. А. Соболев, О. Г. Шамина // Физика очага землетрясений – М.: Наука. – 1975. – с. 104 – 117.

14. Журков, С. Н. Физические основы прогнозирования механического разрушения [Текст] / С. Н. Журков, В. С. Куксенко, В. А. Петров // ДАН СССР 1981, т. 259, № 6, – с. 1350 – 1353.

15. Тарасов, Б. Г. Геотектонические процессы и аномалии квазистационарного электрического поля в земной коре [Текст] / Б. Г. Тарасов, В. В. Дырдин, В. В. Иванов.// ДАН СССР 1990. Т. 312. №5. – с. 1092 – 1095.

16. Иванов, В. В. Геодинамические процессы в земной коре и возмущения электромагнитного поля при образовании разломов [Текст] / В. В. Иванов, В. А. Хямяляйнен, Д. Ю. Сирота, Р. В. Бузук // ГИАБ. – 2008. – №2. – С. 122 – 132.

17. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. –М.: Наука, 1982. –621 с.

18. Сирота, Д. Ю. Повышение скорости вычислений для одной задачи электроразведки [Текст] / Д. Ю. Сирота // Вестник КузГТУ. – 2008. № 1. – С. 81-85.

19. Сирота Д. Ю. Оценка влияния одного горизонтального угольного пласта на распределение электрического поля на земной поверхности / Сирота Д. Ю., Евдокимова А.И. // Вестник КузГТУ 2011 № 5-11 с. 8 - 12.

20. Иванов В.В. Способ определения кинетических констант разрушения / В.В. Иванов, Л.А Белина, Д.Ю. Сирота, Т.М. Черникова // Вестник КузГТУ. 2012. №6. С. 13-16

21. Регель В.Р. и др. Кинетическая природа прочности твёрдых тел /В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский// – М.: Наука, 1974 г., –560 с.

22. Лазарев С.О. Кинетическая концепция прочности в расчётах эластомерных детелей/ С.О. Лазарев, Ю. К. Михайлов// ФТТ, – 2005 г., № 5, с. 951 – 954

23. Веттегрень В.И. Температурная зависимость прочности полимеров и металлов в области высоких температур/ В. И. Веттегрень, В. Б. Кулик, С. В. Бронников// Письма в ЖТФ, – 2005 г, № 22, – с. 47 – 55.

24. Иванов В.В. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах и задача прогнозирования динамических явлений/ В. В. Иванов, П. В. Егоров А. Г. Пимонов// ФТПРПИ – 1990. – Вып. 187/34. – с. 32 –35.

25. Пимонов А.Г. и др. Определение констант прочности и долговечности для образцов из полимерных композиционных материалов / А.Г. Пимонов, В.И. Климов, В.В. Иванов, П. В. Егоров// Вестник КузГТУ, – 1998 г, № 3, с. 11 – 14.

26. Иванов, В. В. Кинетика разрушения и усталостная прочность полимерных соединений/ В. В. Иванов, В. И. Климов, Т. М. Черникова.// – Кемерово, КузГТУ, – 2003 г, – 235 с.

27. Иванов, В. В. Оценка напряжений в разрабатываемых угольных массивах по измерениям потенциала естественного электрического поля на земной поверхности [Текст] / В. В. Иванов, Д. Ю. Сирота // Изв. ВУЗов Горный журнал, – 2009, № 2, – с. 97 –101.

28. Алексеевская, Г. В. Разработка метода обнаружения зон концентраций механических напряжений в массиве по электрометрическим измерениям с дневной поверхности [Текст]: дисс. канд. техн. наук/ Г. В. Алексеевская. – Кемерово 1995, – 135 с.

29. Дихтярь, Т.Д. Промывочные жидкости и тампонажные смеси / Т.Д. Дихтярь. – М.: Недра, 1987. – 119 с.

30. Басарыгин, Ю.М. Заканчивание скважин: учеб. пособие для вузов / Ю.М. Басарыгин, А.И. Булатов, Ю.М. Проселков. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 674с.

31. Булатов, А.И. Спутник буровика: Справ. пособие: В 2 кн. Кн. 2 / А.И. Булатов, С.В. Долгов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 534.

32. Вадецкий, Ю.В. Справочник бурильщика: учеб. пособие для нач. проф. образования / Ю.В. Вадецкий. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 416 с.

33. Хямяляйнен, В.А. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок / В.А. Хямяляйнен, Ю.В. Бурков, П.С. Сыркин. – М.: Недра, 1994. – 400 с.

34. ГОСТ 30515-2013. Цементы. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 30515-97; введ. 2015-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 62 с.

35. ГОСТ 1581-96. Портландцементы тампонажные. Технические условия. – Взамен ГОСТ 1581-91; введ. 1998-10-01. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 12 с.

36. ГОСТ 26798.1-96. Цементы тампонажные. Методы испытаний. – Взамен ГОСТ 26798.0-85 - ГОСТ 26798.2-85; введ. 1998-10-01. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 17 с.

37. ВСН 132-92. Правила производства и приемки работ по нагнетанию растворов за тоннельную обделку. – Введ. 1993-03-01. – М.: ПКТИтрансстрой, 1993. – 40 с.

38. ГОСТ 30744-2001.Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. – Введ. 2002-03-01. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 29 с.

39. Ткалич, В.Л. Обработка результатов технических измерений. В.Л. Ткалич, Р.Я. Лабковская. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 72 с.

40. Из предварительного отчета о состоянии окружающей среды Кемеровской области за 2004 год // ЭКО-бюллетень ИпЭкА. - №3 (110). - 2005. - С. 12-13.

41. Хорошилова, Л. С. Геоэкологическое состояние угледобывающих регионов Кузбасса. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. – 135 с.

42. Иваныкина, О. В. Приоритетные неорганические загрязнители в промышленных отходах Кемеровской области в ОАО «Западно Сибирский Испытательный центр», г Новокузнецк // ЭКО-бюллетень ИпЭкА. - №2 (115). – 2006. - С. 32-33.

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

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

45. 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.

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