

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Неразрушающего контроля
Направление подготовки Приборостроение
Кафедра Физических методов и приборов контроля качества

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

УДК 622.02:53-047.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Помишин Евгений Карлович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. ПНИЛ ЭДиП	Беспалько А.А.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. менеджмента	Николаенко В. С.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Анищенко Ю. В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФМПК	Суржиков А. П.	д.ф.-м.н., профессор		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P1	Способность совершенствовать и повышать свой интеллектуальный и общекультурный уровень и специальные знания в области математических, естественных, гуманитарных и экономических наук в комплексной инженерной деятельности на основе целостной системы научных знаний об окружающем мире;	Требования ФГОС (ОК-1) Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Способность адаптироваться к новым ситуациям, переоценивать накопленный опыт, анализировать свои возможности в понимании сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения коммуникативных задач современных технических средств и информационных технологий в профессиональной области.	Требования ФГОС (ОК-1,2, ПК-19) Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом; эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды, демонстрируя навыки руководства отдельными группами исполнителей; в том числе над междисциплинарными проектами, уметь проявлять личную ответственность, приверженность профессиональной этике и нормам ведения профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2, ПК-12,13,16-18,12,22) Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности; разрабатывать самостоятельно техническую документацию; четко излагать и защищать результаты комплексной инженерной деятельности в областях контроля качества продукции предприятий измерительной техники и точного приборостроения; приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности умения непосредственно не связанных со сферой деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2, ОПК-2, ПК-10,19) Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

P5	Умение использовать основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, основы теоретического и экспериментального исследования в комплексной инженерной деятельности при разработке средств измерения и контроля, используя стандартные пакеты и средства автоматизированного проектирования в приборостроении.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-5-7), Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Умение профессионально эксплуатировать современное оборудование и приборы в соответствии с целями магистерской программы, организовывать технологическую подготовку производства приборных систем различного назначения и принципа действия, разрабатывать и внедрять новые технологические процессы с использованием гибких САПР и оценивать их экономическую эффективность и инновационные риски при их внедрении.	Требования ФГОС (ОПК-3, ПК-5,6,8,20), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Способность проектировать приборные системы и технологические процессы с использованием средств САПР и опыта разработки конкурентоспособных изделий; осуществлять проектную деятельность в профессиональной сфере на основе системного подхода.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-5,10,13,22), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Умение разрабатывать методики проведения теоретических и экспериментальных исследований по анализу, синтезу и оптимизации методов измерения контроля и диагностики, используемых в приборостроении; способность разработать и проводить оптимизацию натуральных экспериментальных исследований приборных систем с учётом критериев надёжности; использовать результаты научно-исследовательской деятельности и пользоваться правами на объекты интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-7,14,15) ПК-2,26,27,28) Критерий 5 АИОР (п.2.3, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Умение организовывать современное метрологическое обеспечение технологических процессов производства приборных систем и разрабатывать новые методы контроля качества выпускаемой продукции и технологических процессов; решать экономические и организационные задачи технологической подготовки приборных систем и выбирать системы обеспечения экологической безопасности в производстве и при технологическом контроле.	Требования ФГОС (ОК-2, ПК-2,6,14,20) Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

P10	<p>Способность проектировать математические модели анализа и оптимизации объектов исследования, выбирать численные методы их моделирования или разработать новый алгоритм решения задачи; выбирать оптимальные методы и программы экспериментальных исследований и испытаний, проводить измерения с выбором современных технических средств и обработкой результатов измерений.</p>	<p>Требования ФГОС (ОК-1,2, ОПК-2, ПК-1,2,6,13) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i></p>
P11	<p>Способность формулировать цели, определять задачи, выбирать методы исследования в области приборостроения на основе подбора и изучения литературных и патентных и других источников; разрабатывать методические и нормативные документы, техническую документацию на объекты приборостроения, а также осуществлять системные мероприятия по реализации разработанных проектов и программ; составлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам исследовательской деятельности</p>	<p>Требования ФГОС (ОПК-1,3, ПК-3,4,9,11) Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i></p>

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки (специальность) – Приборостроение
Кафедра Физических методов и приборов контроля качества

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ Суржиков А.П.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
--

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5А	Помишину Евгению Карловичу

Тема работы:

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объектом исследования являются горные породы, представленные в виде железной руды и вмещающей породы. Образцы имеют форму цилиндра с размерами: высота 80 мм, диаметр 40 мм. Одноосное сжатие осуществляется прессом, развивающим усилия до 50 тонн.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>К анализу подлежат: литература отечественных и зарубежных исследователей с целью выяснения достижений мировой науки в области механоэлектрических преобразований в горных породах; методик квазистатического, динамического и акустического воздействий на образцы горной породы; обработка сигналов электромагнитной эмиссии и анализ их спектров из образцов горной породы при одноосном ступенчатом сжатии; изучение влияния электрического и магнитного полей на параметры электромагнитных сигналов из образцов горной породы при акустическом воздействии.</p>
--	---

<p>Перечень графического материала</p>	<p>Презентация в Microsoft Office PowerPoint 2007</p>
---	---

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Основная часть ВКР</p>	<p>Беспалько Анатолий Алексеевич</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Николаенко Валентин Сергеевич</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Анищенко Юлия Владимировна</p>
<p>Часть ВКР на английском языке</p>	<p>Вебер Юлия Юрьевна</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Механизмы разрушения горных пород, основные гипотезы об источниках генерирования электромагнитных сигналов</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. ПНИЛ ЭДиП	Беспалько Анатолий Алексеевич	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Помишин Евгений Карлович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5А	Помишину Евгению Карловичу

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	1. <i>Потенциальные потребители результатов исследования</i> 2. <i>Анализ конкурентных технических решений</i> 3. <i>Технология QuaD</i> 4. <i>SWOT-анализ</i>
--	---

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. менеджмента	Николаенко Валентин Сергеевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Помишин Евгений Карлович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5А	Помишину Евгению Карловичу

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p><i>Объектом исследования является механоэлектрические преобразования в горных породах при статическом и динамическом воздействиях. Данные исследования в дальнейшем будут применяться для разработки метода мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и прогноза удароопасности.</i></p>
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p>	<p><i>Рабочий процесс проводится в научной лаборатории, где могут быть такие вредные факторы как: повышенный уровень шума и электромагнитных излучений, недостаточная освещенность рабочей зоны. В ходе выполнения работы возможно поражение электрическим током, а также травмы, связанные с острыми краями и движущимися механизмами гидравлического пресса.</i></p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p>	<p><i>В исследованиях используется загрязняющее вещество, как машинное масло в качестве контактного слоя, а также при разрушении образцов горных пород остаются их составляющие.</i></p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p>	<p><i>Возможно возникновение пожара.</i></p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p>	<p><i>Рациональная планировка рабочей зоны, требования к основным элементам рабочего места: экспериментальная установка, образцы горной породы.</i></p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Помишин Евгений Карлович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 111 с., 21 рис., 8 табл., 87 источников, 1 прил.

Ключевые слова: механоэлектрические преобразования, электромагнитная эмиссия, напряжённо-деформированное состояние, горные породы, квазистатическое нагружение.

Объектом исследования являются механоэлектрические преобразования в горных породах при динамическом и статическом воздействии.

Цель работы – исследование характеристик механоэлектрических преобразований в горных породах при динамическом и статическом воздействии.

В процессе исследования проводились: анализ отечественной и зарубежной литературы, изучение методик силового нагружения твердотельных структур, акустического воздействий, проведение экспериментов при статическом и динамическом воздействии на образцах горной породы.

В результате исследования были проанализированы электромагнитные сигналы, полученные при квазистатическом и динамическом воздействии на образцы горной породы

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: образцы горной породы имели форму цилиндра с размерами: высота 80мм, диаметр 40мм.

Степень внедрения: не внедрен, находится на стадии разработки.

Область применения: электроника диэлектриков и полупроводников (геомеханика и геофизика)

Экономическая эффективность/значимость работы: экономический эффект выражается в экономии при использовании метода мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и прогноза удароопасности, основанный на явлении механоэлектрических преобразований энергии;

В будущем планируется продолжить исследование механоэлектрических преобразований в горных породах при изменении напряжённо-деформированного состояния.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ	17
1 Литературный анализ исследований диагностических критериев разрушения на основе электромагнитного излучения	19
1.1 Механизмы разрушения горных пород, основные гипотезы об источниках генерирования электромагнитного сигнала	20
1.2 Основные закономерности генерирования ЭМС при нагружении пород в лабораторных условиях	30
1.3 Использование электромагнитной эмиссии для контроля изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород	33
1.4 Постановка задачи исследования	41
2 Методика проводимых исследований	43
2.1 Методика исследования образцов горных пород при одноосном сжатии	43
2.2 Методика исследования образцов горных пород при динамическом возбуждении	45
2.3 Методика исследования влияния электрического и магнитного полей на параметры электромагнитных сигналов образцов горной породы при динамическом возбуждении	48
2.4 Объект исследования	50
3 Экспериментальные исследования	52
3.1 Исследование параметров электромагнитных сигналов при статическом воздействии на образцы горной породы	52
3.2 Исследование влияния электрического и магнитного полей на параметры электромагнитных сигналов образцов горной породы при динамическом возбуждении	57
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и	63

ресурсосбережение	
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	63
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	63
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений	64
4.1.3 Технология QuaD	67
4.1.4 SWOT-анализ	70
5 Социальная ответственность	76
5.1 Производственная безопасность	76
5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований и эксплуатации	76
5.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	77
5.2.1 Мероприятия по электробезопасности	77
5.2.2 Мероприятия по выполнению норм естественного и искусственного освещения	79
5.2.3 Мероприятия по борьбе с производственным шумом	80
5.2.4 Мероприятия по обеспечению электромагнитной безопасности	81
5.2.5 Мероприятия по обеспечению безопасности оборудования для работников	82
5.3 Экологическая безопасность	84
5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	84
5.3.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования	85
5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	85

5.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	86
5.4.1	Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при исследовании механоэлектрических преобразований в образцах горной породы	86
5.4.2	Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	86
5.5	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	87
5.5.1	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	87
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	89
	СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	91
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	93
	Приложение А – Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке	102

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В данной работе применяются следующие термины соответствующими определениями:

Механоэлектрические преобразования – появление электромагнитных сигналов в процессе механического воздействия.

Напряжённо-деформированное состояние – совокупность внутренних напряжений и деформаций, возникающих при действии на материальное тело внешних нагрузок, температурных полей и других факторов.

Горная порода – агрегат минерала более или менее постоянного состава, образующий самостоятельное геологическое тело.

Руда – вид полезных ископаемых, либо природное минеральное образование, которое содержит соединения полезных ископаемых в концентрациях, делающих извлечение данных компонентов экономически целесообразным.

Вмещающая порода – горная порода, которая заключает в себе рудную залежь, жилу или иное геологическое тело, имеющее полезные ископаемые.

Предел прочности – предельное значение соответствующего напряжения, при котором образец породы разрушается.

Амплитудно-частотная характеристика – зависимость амплитуды колебания на выходе от частоты гармонического сигнала.

Электромагнитная эмиссия – нестационарное (скачкообразное) изменение потенциала электрического поля в ближней зоне излучения, когда длина электромагнитной волны значительно превышает дистанцию между зондом и источником излучения.

Электромагнитный отклик – сигнал, обусловленный механоэлектрическим преобразованием.

Пьезоэлектрические свойства – способность кристаллических веществ создавать электрическую поляризацию при сжатии или растяжении их в определённых направлениях.

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.045–84 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

ГОСТ 12.2.032-78 (2001). Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

ГОСТ 12.1.038 – 82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

СНиП 23-05-95 (СП 52.13330.2011). Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.

ГОСТ 12.1.033 – 81. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Термины и определения.

ГОСТ 12.1.003 – 83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

НДС – напряжённо-деформированное состояние;

ЭМИ – электромагнитное излучение;

ЭМЭ – электромагнитная эмиссия;

ЭМО – электромагнитный отклик;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

АЭ – акустическая эмиссия;

СИ – силоизмерительная система;

ПЭП – пьезоакустический приемник;

ЭМД – электромагнитный датчик;

РЭМС – регистратор электромагнитных сигналов;

ЧС - чрезвычайная ситуация.

ВВЕДЕНИЕ

В начале 70-х годов в Томском политехническом институте под руководством профессора Воробьева А.А. в лабораторных условиях при механическом воздействии на диэлектрические материалы были зафиксированы электромагнитные сигналы. Появление таких сигналов происходит при переходе механической энергии в электромагнитную [1]. Обнаруженное явление было названо механоэлектрическим преобразованием. В дальнейшем наибольшее число исследований посвящено изучению ЭМС при механическом воздействии на диэлектрические материалы. Трансформация механической энергии в электромагнитную зависит от свойств взаимодействующих систем, являющихся носителями энергии и концентрации энергии в них. Воробьев А.А. указывал [2, 3], что все виды энергии могут превращаться в механическую, которая в земных недрах может превратиться в электрическую. Для такого превращения необходимо получение свободных зарядов или заряженных частиц и электрического поля, что может при воздействии на твердое тело достигнуто многими путями, когда образуются заряженные дефекты структуры. Таким образом, причиной появления электромагнитных сигналов является появляющийся или изменяющийся на поверхностях диэлектриков при их деформировании электрический заряд.

Первые проведенные исследования обнаружили, что электромагнитная эмиссия, которая возникает при механоэлектрических преобразованиях, имеет зависимость от прочности горных пород. В сложных гетерогенных системах, такие как горные породы, весьма естественно ожидать некоторые зависимости интенсивности ЭМС от строения и состава, а также и от характера деформации.

На сегодняшний день в проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДиП) Томского политехнического университета (ТПУ) идут разработки метода мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния массивов

горных пород и прогноза удароопасности, основанные на явлении механоэлектрических преобразований энергии [4,5]. Как было уже написано выше, горная порода в массиве для исследований является довольно сложным объектом, так как сами горные породы, слагающие массив, имеют свои физические свойства. Во время отработки месторождений возникают изменения механических напряжений, которые сопровождаются различными динамическими проявлениями. В этом состоянии в массиве активно происходят механоэлектрические преобразования. И тут главное, зная характеристики электромагнитной эмиссии или параметры электромагнитных сигналов, найти основные признаки готовящегося динамического проявления. Поэтому, важно знать ключевые закономерности механоэлектрических преобразований в различных ситуациях. Один из механизмов формирования электромагнитных сигналов представляет собой отклик на внешнее акустическое возбуждение, которое появляется в процессе локальной динамической перестройки структуры горных пород. В связи с этим, одним из возможных способов разработки методов мониторинга геодинамических событий и контроля за процессом разрушения является моделирование в лабораторных и натурных условиях. Это позволит найти зависимость между параметрами механоэлектрических преобразований и объекта исследования.

1 Литературный анализ исследований диагностических критериев разрушения на основе электромагнитного излучения

Задача контроля и прогноза динамических проявлений массивов горных пород является актуальной в связи с интенсивным ведением горных работ в горной промышленности и переходом к добыче полезных ископаемых на более глубоких горизонтах. Ведущие ученые в этой области, изучающие проблемы, связанные с углублением ведения горных работ, Н.В. Мельников [7], Д.М. Бронников, К.Н. Трубецкой [8], Е.И. Шемякин [9] и др., акцентировали внимание на вопросы, имеющие отношение к росту напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород и динамических проявлений горного давления. Динамические проявления, согласно исследованиям И.М. Петухова, Б.Ш. Винокура, П.В. Егорова [10], связаны непосредственно со скоростью изменения напряжений и их величиной

Известно [11], что проведение горных работ приводит к сдвигению, обрушению и деформации горных пород, а данные явления вызывают в свою очередь перераспределение горного давления и, как следствие, - различного рода динамические проявления – стрельяние, шелушение, интенсивные заколообразования, обвалы и обрушения, толчки, микроудары и горные удары. При этом многочисленные исследования показывают, что подготовка динамического события представляет собой достаточно длительный, протекающий в массиве процесс.

Задача изучения и предотвращения подобного рода событий на данный момент является одной из острых проблем в проведении горных работ. В связи с описанным возникла задача изучения изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород с целью прогнозирования и контроля процесса разрушения.

Решить поставленную задачу, несомненно, осложняется тем, что часто месторождения полезных ископаемых имеют уникально-геологическими условиями, которые отражаются на параметрах каждого динамического

проявления и, следовательно, на возможности обеспечения повторяемости натуральных экспериментов. Благодаря этому многие исследователи используют физическое и математическое моделирование изучаемого процесса.

1.1 Механизмы разрушения горных пород, основные гипотезы об источниках генерирования электромагнитных сигналов

Приведем сжатый анализ основных причин, влияющие на процесс разрушения горных пород. Во-первых, согласно [12], структурное многообразие горных пород, которое может встречаться в виде монокристаллического материала с разнообразными размерами кристаллов – от скрытокристаллического до крупнокристаллического, с размерами кристаллов в несколько сантиметров. Во-вторых, процесс разрушения делится на различные масштабные уровни [13-15]. Существует субмикроскопический уровень, когда происходит разрыв различных типов атомных и молекулярных связей; микроскопический, когда процесс разрушения можно рассмотреть в оптический или электронный микроскоп и оно подразумевает рост микротрещин, граней скольжения, разрывы связей между отдельными кристаллами и зернами и разрушения отдельных кристаллов и зерен. Последующий, макроскопический уровень можно увидеть невооруженным глазом в обломках горной породы, которые не включают большие дефекты, такие как, трещины, разделение пластов [13]. Завершающий, мегаскопический уровень. Тут подразумевается процесс разрушения огромных объемов горных пород, в том числе включающих большие механические дефекты.

Как известно, процесс разрушения происходит довольно сложно и имеет немало стадий, количество которых находится в зависимости от того, какие временные и масштабные этапы процесса рассматриваются как индивидуальные стадии. При наиболее общих подходах можно выделить две-

три основные стадии – формирование начальных микротрещин и их переход к образованию очага разрушения и последующим макроразрывом [16].

Первая из названных стадий – формирование микротрещин. Микротрещины формируются приблизительно со скоростями звуковых волн; их размеры зависят от размеров структурных элементов, а энергия активации формирования микротрещин приближенно равна энергии межатомных связей [16]. Зарождение начальной микротрещины за счет этих закономерностей можно рассматривать сложный процесс, развивающийся в несколько этапов. Реальная структурная неоднородность горных пород сильно влияет на приложенную механическую нагрузку, за счет чего распределение нагрузки в материале происходит неравномерно. Поэтому выделяют некоторые микрообласти, имеющие высокую скорость развития процесса разрушения. В этом случае формирование микротрещин происходит преимущественно в наиболее напряженных микро областях и замедляется на границах гетерогенности благодаря протеканию релаксационных процессов [16]. Происходит стабилизация микротрещины, и в последующем ее развитие имеет возможность продолжиться лишь при изменении условий, обеспечивающих новое неустойчивое состояние.

Итак, в теле, находящемся под механической нагрузкой, формируются зародышевые микротрещины, которые стабилизируются на границах структурной неоднородности. Основываясь на этой теории дальнейшее разрушение имеет два пути развития: если стабилизация начальных микротрещин проходит не до конца, то есть оказывается неполной, то некоторые из них будут продолжать расти, что в результате может привести к формированию магистральной трещины, если же стабилизация начальных трещин пройдет до конца, то главным дальнейшим этапом разрушения будет процесс их накопления [17].

На сегодняшний день многие исследователи применяют два подхода модели разрушения: двух- и трехстадийная. Первая из двух – кинетическая концепция прочности твердых тел (дополняющий ее концентрационный

критерий разрушения) с успехом развивается в ФТИ РАН им. А. Ф. Иоффе [17, 18], вторая – в ОИФЗ РАН им. О. Ю. Шмидта [19]. С данных источников можно заключить [17-19], что твердое тело разрушается не только при воздействии механической нагрузки до достижения предела прочности, но и при низких нагрузках, однако при более длительном воздействии. Этот период времени необходим для роста термоактивационного процесса аккумуляции повреждений (трещин), при этом несплошности начинают возникать, когда достигается предельная концентрация трещин в образце. В данном случае процесс разрушения, основываясь на термофлуктуационную теорию разрушения, можно смоделировать как кинетический процесс аккумуляции трещин в конкретном объеме за конкретный промежуток времени. Таким образом, отталкиваясь от этой теории, во время проведения постоянного контроля процесса нагружения возможно определять, какая стадия соответствует данному процессу, насколько далеко он находится от предельного состояния, которое, возможно, приведет к росту магистральной трещины (если эксперимент проводится на образце) либо к динамическому проявлению (если подразумевается участок массива горной породы).

С указанных работ вытекает важный вывод, показывающий нам, что и в образце горной породы, и на участке целого массива, то есть на разных уровнях структуры исследуемых объектов, огромную роль имеет концентрационный критерий разрушения. Первой стадией, по мнению авторов [17], является стадия некоррелированного накопления трещин, второй – стадия образования очага разрушения. Поэтому, на основании данных представлений, в исследовании процесса разрушения при помощи регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ), как изначальную модель разрушения горной породы следует выбрать ту, которая могла бы иметь какие-либо параметры трещин в отчетливом виде.

Необходимым условием генерирования электромагнитных сигналов является электризация имеющихся или вновь образованных поверхностей нагружаемых горных пород [1,20]. Процессы электризации материалов, не

обладающих пьезоэлектрическими свойствами, могут быть обусловлены нарушением двух разнородных тел или являться следствием разрушения твердых фаз горной породы [1]. Немаловажным является факт того что, процессы заряжения при разрыве контактов сгруппировываются следующим способом [1]: электризация во время трения; электризация при «разрыве двойных электрических слоев» (свойственно при деформировании слабосвязанного влажного грунта).

В процессе деформирования твердых фаз породы возникновение зарядов обуславливается перемещением заряженных дислокаций в область механического напряжения (Эффект Степанова) [21-23] либо беспорядочным разрывом межатомных (межионных) связей во время развития трещины [24]. В крайнем случае, на границах трещин появляется зарядовая мозаика.

В научных трудах Шевцова Г.И., Соболева Г.А. совместно с [25,26] и Хатиашвили Н.Г. [27] отображены данные экспериментов по излучению электризации полевого шпата, песчаника и алевролита. Для образцов ортоклаза и микроклина величина плотности зарядов в ходе деформирования составила 10^{-5} – 10^9 Кл/м², а значения плотности тока до разрушения варьировалась в пределах 10^{-5} – 10^{-8} А/м² [25,26].

Основные зависимости электризации материалов, которые не имеют пьезоэлектрический эффект, приводятся к следующим характеристикам [21,28]: электрические заряды аккумулируют в участках неоднородных деформаций; устранение нагрузки приводит к релаксации заряда на период времени, зависящий от таких параметров, как удельное сопротивление и диэлектрическая проницаемость материала; значение заряда электризованной поверхности возрастает с увеличением степени и быстроты нагружения.

В одной из первых работ, посвященных экспериментальному исследованию ЭМС во время нагружения горных пород, возникновение сигналов обуславливалось газоразрядными процессами на границах развивающихся микротрещин [20]. Появление газоразрядного механизма возможно между отдельными областями поверхности микротрещины, на

которые распространяется закон Пашена [24,30], отображающий зависимость потенциала формирования разряда от произведения газового давления на промежуток разряда газа [31]. Нижняя граница газоразрядного интервала, с которого начинает выполняться закон Пашена, равна 5-6 мкм [32] – это одно из основных требований к протеканию разрядных процессов в полости микротрещины. Вторжение газовой среды в полости микротрещины создает дополнительные ограничения на возможности данного механизма генерировать ЭМС.

В реальных условиях из-за наличия неровностей на бортах микротрещин и появления вязкости воздуха при прохождении узкой щели, величина τ будет превышать расчетные значения [33]. Соответственно уменьшится и значение скорости роста трещин $V_{тр}$, при котором возможно заполнение воздухом всей полости микротрещины в случае единичного акта ее развития. Таким образом, возможность генерирования ЭМС за счет газоразрядных процессов ограничена скоростью движения микротрещины, скоростью диффузии воздуха, размером зазора между берегами трещины и величиной разности потенциалов между ними. Трудно ожидать, что на всех этапах развития микротрещины будет соблюдаться оптимальное для протекания газоразрядных процессов соотношение в значениях отмеченных величин. С учетом высокой степени корреляции электромагнитных сигналов с микроразрушением [34] следует полагать, что газоразрядный процесс является не единственным возможным источником ЭМС.

Более универсальным (с точки зрения минимума ограничений) является группа механизмов, связанных с трансляцией заряда. Для их реализации необходимо лишь наличие заряда и его движение, что имеет место при развитии нарушений сплошности. Один из первых механизмов генерирования ЭМИ происходит в результате трансляции зарядов, данная теория изложена в работе [30], где возникновение излучения обуславливается тем, что дипольный момент системы зарядов изменяется во время развития микротрещины. Мирошниченко М.И. и Куксенко В.С. [35] экспериментально доказали

существование такого источника излучения ЭМС. Перельман М.Е. и Хатиашвили Н.Г. [24], не отрицая факт того, что газоразрядные процессы имеют возможность генерировать ЭМС, в последующем предложили целую группу моделей, которые основываются на трансляции заряда. Авторы полагают, что источником сигналов, возможно, является изменение емкости в ходе перемещения заряженных граней микротрещин относительно друг друга, и кроме того ускоренным формированием заряженного устья или бортов микротрещин.

В крайнем случае, на начальных этапах нагружения диапазон частоты сигнала равен $1-10^3$ МГц. При этом протяженность элементарного скачка трещины составляет $1-100$ мкм, а скорость ее развития 10^3-10^4 м/с. С оценкой нижней границы частотного диапазона трудно согласиться, т.к. минимальная скорость движения микротрещин на ранних стадиях нагружения может иметь значения порядка 10^{-1} м/с [36]. Тогда, следуя выкладкам Перельмана М.Е. и Хатиашвили Н.Г., нижний предел частот будет лежать в диапазоне 10^3 Гц, который сходится с результатами экспериментов согласно исследованиям спектров ЭМС в горных породах [37]. В описанных трансляционных моделях генерирования ЭМС появление сигналов, как отмечалось выше, связано с процессами роста микротрещин. Однако при аналитическом описании интенсивности ЭМС не учитывается основное положение механики хрупкого разрушения, согласно которому скорость роста микротрещин является функцией коэффициента интенсивности напряжений [38], а, следовательно, зависит от величины приложенной нагрузки.

Отмеченные выше механизмы генерирования ЭМС могут иметь место при разрушении твердой фазы горной породы. В работе [39] рассматривается модель генерирования импульсов при нагружении дисперсных грунтов, в которых преобладающими являются водноколлоидные связи. ЭМС в этом случае есть результат направленного движения ионов диффузного слоя при переукладке дисперсных частиц под действием механических напряжений.

Изложенные модели рассматривают формирование сигнала при неупругих деформациях, когда протекают процессы нарушения сплошности материала или происходит переукладка дисперсных частиц.

В некоторых работах указано, что, и воздействие упругими волнами на материал способно сопровождаться излучением ЭМС. Так, Перельман М.Е. и Хатиашвили Н.Г. [40-42], путем теоретических расчетов и экспериментов доказали, что движение акустических волн через горную породу сопровождается генерированием ЭМС, который, возможно, является результатом появления, освобождения и колебаний в области звуковых волн заряженных дислокаций, колебаний флуктуационно-заряженных плоскостей микротрещин, колебаний двойных электрических слоев в области звуковых волн. Свойственным для ЭМС, которые возникают в ходе линейных деформаций элементарных источников, считается то, что частотные свойства сигнала формируются спектром акустического поля [41, 43].

В реальных условиях в пункте наблюдения сигнал является продуктом суперпозиции многих элементарных источников, а возможность приема ЭМС обусловлена степенью синхронности единичных излучателей, их количеством, а также электрофизическими характеристиками трассы распространения [20, 44].

В работе [44] предложено соотношение, связывающее напряженность поля в пункте приема с микроскопическими характеристиками синхронно работающих элементарных излучателей. Самоослабление поля за счет наличия источников с противоположной ориентировкой дипольных моментов учитывается посредством множителя $n^{0.5}$, где n —число элементарных источников в объеме, что позволяет предполагать наличие связи интенсивности ЭМС с масштабом нагружаемого материала.

Вишневская Н.Л. и Защинский Л.А. [45], исследуя систему заряженных микротрещин и сравнивая ее с диполями с хаотичным направлением дипольных моментов, которые на некоторой стадии нагружения имеют возможность получать преимущественную ориентацию, обрели величину

напряженности поля как функцию концентрации элементарных источников и среднего значения их электрического момента. При этом, минимальное значение концентрации элементарных источников, которая необходима для присутствия самосогласованного поля, пропорционально величине энергии формирования трещины и обратно пропорционально величине дипольного момента элементарного источника.

Теоретически полученная связь между напряженностью поля и энергией образования трещин важна с практической точки зрения, так как она позволяет нам приступить, в конечном итоге, к поиску зависимости прочности материала от пороговых характеристик интенсивности ЭМС.

Воробьевым А.А. с соавторами [46] получены выражения, связывающие напряженность поля с макроскопическими характеристиками источника, представленного поляризованным эллипсоидом. Поляризация в их модели происходит вследствие ориентации электрических осей элементарных источников вдоль одной из осей эллипсоида. Предполагается также, что мгновенные мощности элементарных источников равны. Наблюдения ведутся в ближней зоне, вмещающие породы и сам источник однородны, в смысле удельного электрического сопротивления, и характеризуются своими значениями проводимости. Тогда в приближении био-совара напряженность поля пропорциональна отношению максимальной разности потенциалов поляризации к длине оси поляризации эллипсоида.

Авторы работы [20] полагают, что при наличии вдоль трассы распространения ЭМС пород с низким удельным сопротивлением ($10 \cdot 10^2$ Ом*м), прохождение сигналов затрудняется из-за сильного его ослабления. Поэтому, для уверенного приема сигналов, распространяющихся от очага концентрации напряжений «прямым лучом», предлагают располагать датчики в местах выхода на дневную поверхность кристаллических массивов, имеющих удельное сопротивление порядка $10^3 \cdot 10^5$ Ом*м [47].

В работах [20, 47] обсуждается возможность генерирования сигналов за счет протекания нестационарных токов электрокинетической или

дислокационной природы в ламинарных или турбулентных мегаструктурах. Оценки показывают, что на стадии лавинного нарастания числа трещин плотность тока погруженного источника (мегаструктуры) может достигать $1-10^2$ А/м². Тогда в диапазоне частот 10^2-10^3 Гц, при проводимости верхних слоев земной коры $10^{-2}-10^{-3}$ См/м и глубине залегания источника 10 км, напряженность поля на дневной поверхности может принимать значение $10^{-5}-10^{-2}$ В/м. Возможность приема сигналов в этом случае обеспечивается условиями распространения по трассе Земля-ионосфера.

В перечисленных работах полагают совпадение в пространстве очага готовящегося разрушения с макроскопическим источником генерирования ЭМС.

В ряде работ рассматриваются случаи, когда очаг готовящегося разрушения и источника ЭМС не совпадают в пространстве [48-50]. Так, учитывая, что при подготовке сейсмического события деформируются области земной коры, расположенные выше очаговой зоны, в качестве возможного источника ЭМС предполагают совокупное действие элементарных излучателей в поверхностном слое, находящемся в поле механических напряжений очага будущего землетрясения [20,49,51]. Наблюдение сигналов при возбуждении их в поверхностном слое возможно не только в области активного деформирования, но и вне зоны некоторой пороговой деформации при соответствующих значениях мощности импульсов и характеристик трассы распространения [20,48]. В рассмотренных работах авторы сходятся во мнении, что аномальное изменение ЭМС перед разрушением связано с активизацией механоэлектрических преобразований в очаге или области подготовки разрушения. Такой подход, согласно терминологии, предложенной Гохбергом М.Б., Моргуновым В.А. с соавторами [52], будем называть концепцией активных излучателей. Большой объем экспериментальных работ, подтверждающий достоверность концепции активных излучателей, проведен в Томском политехническом университете под руководством Воробьева А.А.

При наблюдении за частотой следования ЭМС на различных гипсометрических уровнях, между которыми находился слой воды (до 50 м) или слой пород (мощностью до нескольких сотен метров), выявлено, что интенсивность сигнала на дне водоема или в штольне в несколько раз больше, чем на поверхности воды или пород [43,53-55]. Массив пород, возбужденный большим зарядом взрывчатого вещества релаксирует «довольно длительное время к исходному состоянию, генерируя при этом ЭМС со спадающей во времени частотой следования» [43].

Анализируя результаты своих наблюдений, авторы работ [50,56] приходят к выводу, что возможность регистрации электромагнитных сигналов, отражающих механоэлектрические процессы в очаге землетрясений, может определяться следующим: на заключительной стадии подготовки сейсмического события, когда наиболее активно происходят механоэлектрические преобразования в очаге, напряженность электрического поля в эпицентральной области достигает значения, достаточного для возникновения микропробоев в атмосфере. Наличие ионизированной области над эпицентром может изменить условия распространения атмосфериков над сейсмоактивным районом, что приводит к искажениям (проявлениям аperiodической составляющей) естественного электромагнитного фона. Такой подход в объяснении появления аномалий ЭМС перед землетрясением называется концепцией изменений условий распространения [52]. Не трудно заметить, что согласно этим двум концепциям, аномалии в интенсивности ЭМС принято связывать с активизацией механоэлектрических преобразований на заключительной стадии подготовки сейсмического события.

Следует ожидать [45] наличия связи между прочностью горных пород и пороговым значением интенсивности ЭМС, а тот факт, что в пункте приема сигнал является суперпозицией многих элементарных источников позволяет предполагать наличие зависимости параметров ЭМС от объема.

1.2 Основные закономерности генерирования ЭМС при нагружении пород в лабораторных условиях

Воробьев А.А. и Сальников В.Н. при нагревании образцов горных пород и минералов наблюдали ЭМС на фиксированных частотах в диапазоне длин волн от 25 до 2000 м [42,56,57]. Появление ЭМС связывается в этих работах с разрядными процессами между заряженными до высоких потенциалов поверхностями микроразрушений. Разрушение же может иметь место вследствие неоднородного термического расширения, вскрытия газовой-жидких включений и фазовых переходов [58]. В рассматриваемых работах обращает на себя внимание тот факт, что появление ЭМИ в длинноволновом диапазоне распространено по всему температурному интервалу, а для коротковолнового диапазона импульсы возникают преимущественно в области с высокой температурой (710-730°C). Данные результаты дают толчком к возможности существования закономерностей между длительностью ЭМС и величиной возмущающего фактора (в представленном случае - термонапряжения).

Авторы работы [59] исследовали ЭМС в узком диапазоне частот при циклическом нагружении образцов. При достижении нагрузкой величины P_i , равной по значению предыдущему циклу. Отмечается резкий скачок кривых проводимости, акустической и электромагнитной эмиссий. Так же как и в работах [43,57,58] появление ЭМС связывается с процессами микроразрушения, о чем свидетельствует временная корреляция акустических и электромагнитных сигналов. Однако, при нагрузках $P > P_i$ число ЭМС снижается до уровня фона, хотя количество акустических сигналов (контролирующих процесс разрушения) продолжает расти. Так как в этих экспериментах меняется только величина нагрузки, имеется основание предполагать, что уменьшение ЭМС при активном процессе микроразрушения может быть обусловлено смещением амплитудно-частотных характеристик сигналов под действием напряжений.

Имеются данные [34], согласно которым при узкополосном приеме ЭМС наблюдается высокая степень корреляции электромагнитного и акустического сигналов. Эти результаты получены при высокой чувствительности канала регистрации ЭМС для случая одноосного нагружения образцов бетона размером (0,55*0,55*0,65 м³). Возможность приема ЭМС в узкой полосе частот на протяжении всего цикла нагружения связано, по-видимому, с тем, что в большом образце не исключена вероятность формирования локальных областей разрушения, генерирующих сигналы в определенном диапазоне спектра. В работе Гончарова А.И. с соавторами [34] отмечается «затишье» электромагнитных сигналов перед разрушением.

Из работ Соболева Г.А. с соавторами [60] следует, что загробление чувствительности канала регистрации ЭМС приводит к потере информации о процессах разрушения. Принимая ЭМС в том же диапазоне частот, что и Гончаров А.И. [34], однако с худшей (в три раза) чувствительностью, Соболев Г.А. отмечает совпадение во времени лишь отдельных акустических и электромагнитных сигналов.

Если говорить об величине амплитуды сигналов, важно отметить результаты исследований Воробьева А.А. с соавторами [26] и Корнейчикова В.П. [61], которые зафиксировали увеличение амплитуды с возрастанием нагрузки. Авторы связывали данную зависимость с ростом размера несплошностей в горных породах, что не противоречит результатам, приведенных в [27, 37].

Впервые в работе [62] экспериментальным путем показана правомочность теории о зависимости пороговых характеристик интенсивности ЭМИ со значением прочности материала, которая вытекает из анализа исследований Защинского Л.А. и Вишневецкой Н.Л. [45]. Авторы [62] отмечают наличие нижней границы нагрузки на породу, при которой наблюдается излучение ЭМС. Между тем, они лишь представили констатацию факта, при этом, не исследовав вопрос о зависимости прочности материала со значением пороговых характеристик интенсивности ЭМС.

Гольд Р.М. и другие [29] при одноосном нагружении образцов горных пород наблюдали электромагнитные сигналы в диапазоне частот 150 кГц – 1 МГц. В данных исследованиях максимальное общее количество ЭМС во время процесса нагружения варьируется на нижнем пределе полосы пропускания и связан с прочностными свойствами образцов.

Корнейчиковым В.П. [61] также подтверждается факт увеличения суммарного количества ЭМС в ходе увеличения значения прочности пород. Эти результаты показывают, что ЭМС чувствителен к значению прочности пород и, исходя из данных, которые приведены в работах [45,62], имеет место рассуждения о принципиальной возможности оценки прочности по пороговым величинам интенсивности ЭМС.

Хатиашвили Н.Г. [37], исследовав спектры ЭМС щелочно-галлоидных кристаллов и горных пород во время разрушения, делает заключение, что частота сигнала лежит в довольно широком диапазоне (от единиц килогерц до мегагерц), но при этом, каждому материалу соответствует свое максимальное значение амплитудно-частотной характеристики, которое приходится на диапазон 1-50 кГц. Спектр сигнала во время разрушения образцов пород, составленных в форме «сэндвича», представляет собой сумму спектрального состава сигналов, которые генерируются каждым образцом.

Имеются данные, свидетельствующие о том, что электромагнитные сигналы генерируются не только при деформировании скальных пород, но и дисперсных.

Воробьев А.А. и другие [63] зафиксировали ЭМС в ходе ударного воздействия на образцы кварцевого песка (80%) с примесью глинистого материала (20%), при этом, образцы имели различную влажность. Между тем, большое содержание пьезоэлектрического материала в экспериментальных образцах оставляет открытым вопрос о формировании ЭМИ из-за разрыва водно-коллоидных связей в процессе переукладки зерен минералов в области механических напряжений.

1.3 Использование электромагнитной эмиссии для контроля изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород

В естественном залегании массивы горных пород находятся в условиях действия всестороннего сжатия, развивающегося под влиянием веса вышележащих горных пород (гравитационных сил), температурных градиентов и геохимических процессов. С увеличением разработок возрастает горное давление. В результате массивы горных пород оказываются в сложном напряженном состоянии, которое постоянно меняется под воздействием горнодобывающих работ, что приводит к различным геодинамическим явлениям, которые влекут за собой не только значительные экономические потери, но и существенно влияют на безопасность ведения горных работ. В связи с этим остро стоит проблема оценки напряженно–деформированного состояния массивов. При механическом воздействии на горные породы происходят механоэлектрические преобразования энергии, в результате которых генерируются электромагнитные сигналы [71]. Это обстоятельство послужило основанием для разработки метода оценки напряженно - деформированного состояния массивов горных пород и прогноза геодинамических событий. Он базируется на следующих положениях:

1. Геодинамическое событие является результатом разрушения горных пород при достижении ими предела механической прочности.

2. Разрушение горных пород представляет собой многостадийный процесс формирования и развития микротрещин, при котором этап формирования очага разрушения отделен во времени от самого акта разрушения.

3. На этапе формирования очага разрушения активизируются процессы возникновения и роста микротрещин, сопровождаемые увеличением выделяемой электромагнитной энергии.

Большое число исследователей, разрабатывая метод регистрации естественного электромагнитного излучения в связи с проблемой горных ударов и оценкой напряженного состояния шахтных полей, используют скорость изменения электромагнитного потока или его интенсивность. Однако возникает вопрос: влияют ли размеры области разрушения на интенсивность электромагнитного сигнала [70,72,73].

Эксперименты, проведенные на образцах горных пород, показали, что масштабный фактор оказывает влияние на зависимость интенсивности излучения от действующих напряжений только до определенного объема. Учитывая, что в натуральных условиях объем материала, находящегося в поле механических напряжений, достаточно большой, можно ожидать, что влияние объема очага механического напряжения на результаты наблюдений импульсного электромагнитного сигнала отсутствует. В этом случае интенсивность излучения определяется, в основном, влиянием отношения напряжения в массиве к прочности пород [68].

При анализе результатов экспериментальных исследований распределения числа электромагнитных импульсов по амплитуде при одноосном сжатии песчаников замечено, что параметры ЭМС зависят от величины действующих напряжений.

Электромагнитную (ЭМЭ) и акустическую (АЭ) эмиссию, которые выделяются в нагруженных твердых телах, можно использовать как индикатор положения трещин и дефектов, их размера и направления. Когда в твердом теле возникает трещина, грани трещины представляют собой обкладки конденсатора, а заряды, расположенные на них представляют собой электрический диполь или четырехполюсник. Размер конфигурации электрических зарядов и дипольный момент зависят от времени. Электромагнитные явления связаны с перераспределением электрических зарядов. Электрические и магнитные поля могут быть обнаружены в окрестности трещины, хотя электромагнитное поле допускается и на более дальнем расстоянии. Так электрический датчик - две проводящие пластины

установленные на образце, создавая тем самым конденсатор с параллельными обкладками. Этот конденсатор используется для улавливания электростатического поля, создаваемого распределением электрических зарядов [69]. Создание новой трещины сопровождается фононами. Они измеряются с помощью сигнала акустической эмиссии. Электромагнитный сигнал предшествует отклику акустической эмиссии, а время задержки соответствует скоростям распространения звука и электромагнитных сигналов. Испытывались образцы гранита с размерами 4·4·1 и 8·4·1 см³. Они нагружались с линейно возрастающим усилием до их разлома. На параллельной стенкам образцов пластине конденсатора регистрировали электрическое напряжение, находящееся в зависимости во времени от колебаний стенок трещины. По высокочастотной компоненте была определена длина трещины 0.3–1.5 мм. Положение трещины было определено в эксперименте с четырьмя конденсаторными и четырьмя акустическими эмиссионными датчиками. Одновременное исследование ЭМЭ и АЭ сигналов позволило определить положение трещины в образце и оценить размер трещины. Этот метод можно использовать для образцов с низкой электрической проводимостью, и он был успешно применен для гранита и композитных материалов [71].

При механическом воздействии горных пород возникает вызванная поляризация. Под действием механических сил на элементарную ячейку пространственной решетки кристаллов происходит смещение центров тяжести зарядов разных полярностей. В итоге возникают электрические диполи, формирование и релаксация которых сопряжены с движением заряженных частиц, т.е. с электрическим током.

В состав горных пород могут входить вещества трех типов: диэлектрики (большинство породообразующих минералов), ионные проводники (флюид, содержащий растворы солей и заполняющий поры и трещины) и электронные проводники (рудные минералы). В данных средах на границах фаз находится двойной электрический слой, которому характерно упорядоченное расположение ионов. При более распространенных случаях, когда твердая фаза

представлена диэлектриком, здесь ток может течь лишь в жидкой фазе. Поэтому, вектор напряженности имеет направление электрического поля параллельно двойному электрическому слою. При уменьшении размеров пор двойные электрические слои начинают оказывать влияние на движение зарядов разного знака. Явление вызванной поляризации в ионопроводящей горной породе выражается довольно слабо - поле вторичного заряда, возникающего в процессе протекания электрического тока в земле, не превосходит первых процентов от первичного поля. Если в среде присутствуют минералы с электронным типом проводимости, такие как сульфиды (пирит, халькопирит и др.), графит, магнетит, либо металлические техногенные объекты, то твердая фаза уже не является диэлектриком и ток течет поперек двойного электрического слоя. При этом протекают существенно более интенсивные электрохимические и электрокинетические процессы, и поле вторичных источников, возникающих на границе твердой и жидкой фазы, может составлять десятки процентов от первичного поля.

Одни из самых первых работ по синхронной регистрации сигналов АЭ и ЭМИ представлены работами под руководством М. А. Садовского [74,75], где объясняется эксперимент на блоках бетона, имеющих размеры $0.55 \times 0.55 \times 0.55$ м³. Нагружение производилось на прессе ИФВД РАН, развивающий усилия до 500 МН. Для измерения ЭМИ использовался приемник с высокочастотным усилителем в интервале частот $10^4 - 0.8 \cdot 10^6$ Гц. Установлено, что оба типа сигналов обладают импульсным характером с амплитудами, которые имеют различия более чем на порядок, при этом, количество и тех, и других возрастает по мере увеличения нагрузки.

Яковицкая Г.Е. провела краткий обзор результатов экспериментальных исследований, использующие метод, основанный на записи, сопутствующего образованию трещин в породных образцах, ЭМИ сигнала и пришла к следующим выводам [76]:

1. Число импульсов, а также их интенсивность увеличиваются как с возрастанием прочности испытываемого материала, так и с повышением величины нагрузки и его скорости; регистрируемые одновременно импульсы акустической эмиссии (АЭ) и ЭМИ при возрастании нагрузки увеличиваются с постоянным значением, но не синхронно.

2. В ходе нагружения образцов горной породы импульсы ЭМИ, лежащие в низкочастотном диапазоне, возникают на этапе микропластической деформации и сопутствуют весь временной период процесса деформирования, в то время как, сигналы, имеющие высокочастотный диапазон, усиленно генерируются только на начальном и последнем – критических этапах нагружения.

3. Логично гипотеза, что, когда достигается критическая концентрация трещин, имеет место быть их слияние и формирование более длинных трещин, которые излучают акустические волны и электромагнитные сигналы с низкой частотой.

4. В ходе спектрального анализа электромагнитных сигналов, по данным которых созданы изолинии амплитуд спектров, представлено, что моменту разрушения материала соответствуют участки изолиний с увеличенными значениями амплитуд спектров.

5. Установлено, что разные стадии деформирования и разрушения образцов горных пород показаны в виде последовательной смены состояний, каждое из которых характеризуется определенной формой частотного спектра эмиссионных сигналов. При этом результаты лабораторных экспериментов по регистрации АЭ на образцах гранита показали, что на первой стадии нагружения сигналы регистрировались с высокочастотной области частотного диапазона, а на второй стадии происходило его снижение. На последней стадии флуктуации охватывали практически весь частотный диапазон спектра сигналов АЭ.

б. Сделан вывод, о том, что изменение коэффициента корреляции можно считать прогностическим признаком для контроля процесса разрушения.

В лабораторных экспериментах следует соотнести различные этапы механического нагружения с анализом осциллограмм и спектрально-временных характеристик сигналов ЭМИ. При этом необходимо проведение значительного количества лабораторных экспериментов по синхронной регистрации исследуемых параметров, повторяемость результатов которых позволит выявить устойчивые закономерности в эмиссионных сигналах, что требует разработки новой, с использованием современных методов и средств, многоканальной системы регистрации механических и электромагнитных сигналов [76].

В Китае проявляют заинтересованность к применению метода ЭМИ для прогноза неожиданных выбросов горной породы, угля и газа, представляющих огромную опасность в шахтах этой страны [82]. На основе изучения физики процесса данных явлений была представлена оценка возможности его прогнозирования [81, 82]. Здесь работы продвигаются и расположены на начальных стадиях исследований. Приведены результаты изучения закономерностей и механизма влияния газа на ЭМЭ и некоторые принципы прогнозирования выброса угля и газа на основе оценки количества импульсов ЭМЭ. Предполагается, что ЭМЭ имеет тесную связь с нагрузкой на угольный пласт и массив пород, а также с процессом их деформирования и трещинообразования. Газ в угольном пласте может усиливать ЭМЭ, а его течение и ударное воздействие могут вызвать ЭМЭ. Величины амплитуды и коэффициента пульсации пакета электромагнитных волн в полной мере отражают опасность выброса угля и газа. В основе методического обеспечения лежат приборы типа «Ангел», закупленные в России, позволяющие определять опасные зоны внезапных выбросов. Однако надежные критерии, предопределяющие приближение катастрофических событий, до настоящего времени не разработаны. Исследуя процессы внезапных выбросов угля и газа,

авторы цитированных работ считают, что возможны два вида разрушения – с постепенным и ускоренным нарастанием интенсивности сопутствующих сигналов ЭМИ в момент разрушения угля.

На Таштагольском месторождении для прогноза удароопасности использовались и другие методики [79, 80], например, методика, основанная на регистрации амплитуды суммарного поля ЭМИ за определенный интервал времени. Последняя была реализована с помощью аппаратуры РВИНДС [79,86]. Попытка расширить частотный диапазон исследований при регистрации ЭМИ от 20 до 200 кГц была опробована с помощью макета аппаратуры, разработанной Центральной научно-исследовательской лабораторией военизированных горноспасательных частей (ЦНИЛ ВГСЧ) Урала [86], работающей с набором узкополосных электрических и магнитных антенн, прошедшей испытания на месторождениях СУБРа (ш. 14-14 бис). Основные критерии, реализованные в данной аппаратуре, - количество импульсов ЭМИ от начала наблюдения – так называемый счет импульсов, и скорость счета – скорость следования импульсов в единицу времени.

По мнению Г.Е. Яковицкой главными результатами исследований сигналов ЭМИ во время проведения экспериментов в натуральных условиях являются следующие [76]:

1. В качестве преобразователя механической энергии в электрическую при землетрясениях и динамических проявлениях горного давления в ОИФЗ РАН как один из основополагающих принят механизм дипольного излучения зарядовой мозаики на бортах раскрывающихся трещин.

2. Отмечено: поскольку генерации ЭМИ – процесс по своей природе динамический, то активизация процесса деформирования участков массива перед горными ударами или поверхностным слоем перед землетрясениями увеличивается, причем здесь важны не столько абсолютные значения изменений напряжений или деформаций, сколько скорости их нарастания или спада.

3. На стадии подготовки горного удара в большом количестве возникают мелкие трещины, генерирующие высокочастотные электромагнитные импульсы; при достижении концентрации вероятно их слияние и появление более длинных трещин, излучающих акустические и низкочастотные электромагнитные сигналы.

4. При прогнозе удароопасности в подземных горных выработок с регистрацией сигнала ЭМИ при амплитуде, не превышающей в три раза ее величины, измеренной вне зоны опорного давления, ситуацию считают неудароопасной, при больших значениях амплитуды – удароопасной

5. При прогнозе землетрясений аномально высокие вариации импульсного электромагнитного поля (ИЭМП) наблюдались за несколько суток или десятков часов до землетрясений.

6. Уровень фоновой интенсивности ИЭМП перед землетрясениями изменяется на порядок.

Основными недостатками метода, который основывается на регистрации сопутствующих процессу разрушения сигналов ЭМИ, а также критериев, методик и приборов, применяемых в экспериментах во время натуральных условий, являются применяемый счет импульсов ЭМИ и скорость счета, регистрируемых в узкой полосе частот. В основном в низкочастотной части соответствующего частотного диапазона (до 50 кГц), затрудняется применение указанного критерия, так как именно в этом диапазоне частот (до 30 кГц) имеет место наибольший уровень промышленных помех, которые могут быть зарегистрированы как полезный сигнал и тем самым внести ошибки в результаты измерений. Кроме того, регистрация низкочастотной огибающей высокочастотного сигнала производится в низкочастотной части частотного диапазона, что не позволяет анализировать, во-первых, процесс возникновения мелких трещин, соответствующих высокочастотным сигналам, и, во-вторых, переход от высокочастотных составляющих сигналов к низкочастотным, предваряющим, по мнению авторов [18, 77, 78], процесс нарушения сплошности.

1.4 Постановка задачи исследования

Проведя анализ литературных данных, следует подчеркнуть, что к настоящему времени было проведено огромное количество исследований явления механоэлектрических преобразований энергии не только в горных породах, но и в различных диэлектрических материалах. Определены источники, которые ответственны за генерирование электромагнитного сигнала, разработаны механизмы механоэлектрических преобразований и выявлены их основные закономерности. Все эти исследования позволяют сделать важный вывод о применимости явления механоэлектрических преобразований для контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и прогноза геодинамических явлений, таких как горные удары, землетрясения, для контроля сдвижения экзогенных геологических процессов. Широкое применение явления получило также для задач дефектоскопии. На протяжении всего периода исследования явления механоэлектрических преобразований разрабатывается и улучшается аппаратура, необходимая для регистрации различных параметров электромагнитного сигнала, предложены критерии оценки состояния исследуемого объекта по регистрируемым параметрам. Между тем, несмотря на то, что в основном исследованы физические основы изучаемого явления, на сегодняшний день нет надежных критериев прогноза геодинамических событий. Прогноз любого события это установление места его локализации, времени проявления и оценка выделившейся энергии.

Одним из доступных способов разработки методов прогноза геодинамических событий и контроля за процессом разрушения является моделирование в лабораторных и натуральных условиях. Это позволит выявить связь между механоэлектрическими преобразованиями и объектом исследований. Сам процесс разрушения горных пород не внезапный акт, а заключительный этап процесса, характеризующегося определенной длительностью и проходящий в своем развитии несколько стадий.

Сложная иерархическая структура горных пород приводит к тому, что на протяжении всего процесса деформирования изменяются параметры регистрируемого ЭМС. Вследствие этого, основной задачей прогноза является оценка взаимосвязи параметров ЭМС на определенных этапах напряженно-деформированного состояния и выявление параметра, являющегося прогностическим признаком разрушения.

Поэтому целью настоящей работы было исследование характеристик механоэлектрических преобразований в горных породах при статическом и динамическом воздействии.

2 Методика проводимых исследований

2.1 Методика исследования образцов горных пород при одноосном сжатии

В лабораторных экспериментах проводились исследования закономерностей параметров механоэлектрических преобразований при одноосном сжатии, а также при детерминированном акустическом воздействии. Это позволяло с определенным приближением моделировать внешние воздействия, испытываемые горными породами в естественных условиях. Сжатие образцов производилось до их разрушения. Поскольку горные породы имеют сложный состав, который не воспроизводим от образца к образцу, было измерено максимально возможное число физических величин, характеризующих состояние исследуемой породы.

Экспериментальные исследования проводились на установке, блок-схема которой представлена на рисунке 1. Одноосное сжатие осуществляли на прессе с подвижной (1) и опорной (2) плитами, развивающими усилие до 50 тонн и встроенной силоизмерительной системой СИ (8). Аналоговый сигнал силоизмерительной системы и значения продольной деформации, возникающей в процессе сжатия образца, записывали в память компьютера (ПК) (9) с использованием специальной программы. К образцу через акустический контакт (минеральное масло) с помощью пьезоизлучателя (3) вводился детерминированный акустический сигнал. Акустический сигнал, проходя через образец, регистрировался с помощью пьезоакустического приемника (7). Электрическую составляющую ЭМС, генерируемого образцом при прохождении акустического сигнала принимали дифференциальным емкостным датчиком ЭМД (6) (со встроенным усилителем мощности) и записывали с помощью многофункциональной платы ввода-вывода (5) для дальнейшего анализа его параметров.

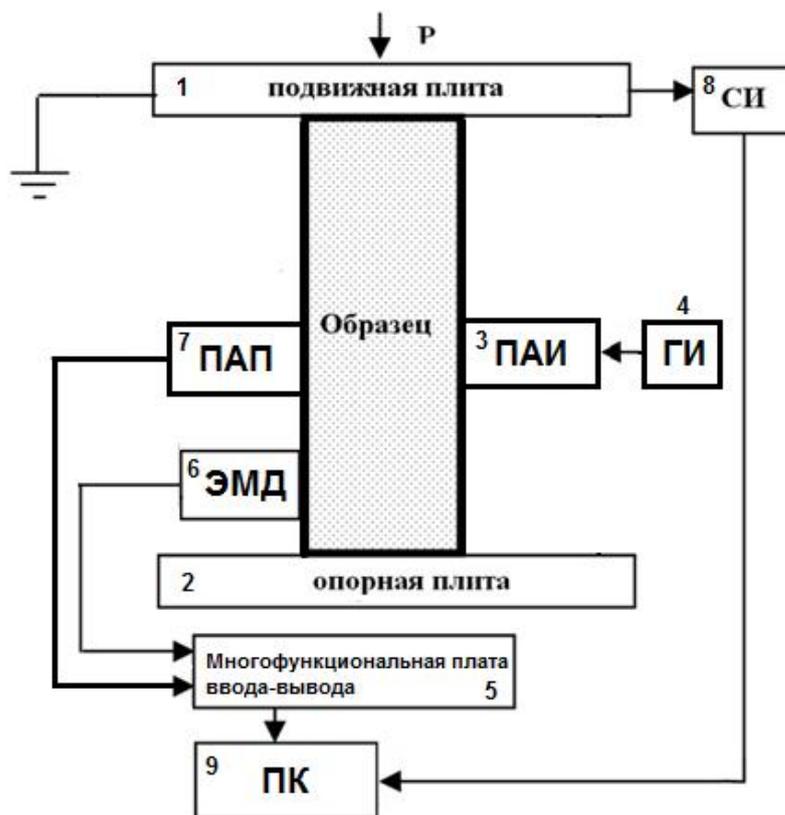


Рисунок 1. Блок-схема установки для исследования параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при одноосном сжатии образцов

В данном эксперименте источником акустического сигнала был пьезоэлектрический преобразователь (3), изготовленный на базе пьезокерамики ЦТС-19 (цирконат-титанат свинца). Для такой пьезокерамики коэффициент электромеханической связи составляет 0.523. На излучатель подавались прямоугольные импульсы, которые были получены с использованием высоковольтного генератора (4). Длительность импульсов генератора может варьироваться в пределах 10^{-6} - 10^{-4} с. При этом напряжение импульсов может изменяться от 100 В до 800 В. Широкополосный пьезоэлектрический датчик (7), изготовленный также на базе ЦТС-19, был использован для регистрации акустического сигнала, прошедшего через образец. Сигнал, сформированный принимающим пьезоэлектрическим датчиком, поступал на многофункциональную плату ввода-вывода. В описанных в данной работе экспериментах длительность и напряжение импульсов составляли 5 мкс при напряжении возбуждения пьезоэлектрического преобразователя 800В.

2.2 Методика исследования образцов горных пород при динамическом возбуждении

При динамическом воздействии использовался стальной шарик, который вылетал из пистолета с пружинным устройством. Шарик пролетал через измерительную трубку и осуществлял удар по образцу, возбуждая акустический импульс. Блок-схема системы с динамическим возбуждением, представлена на рисунке 2.

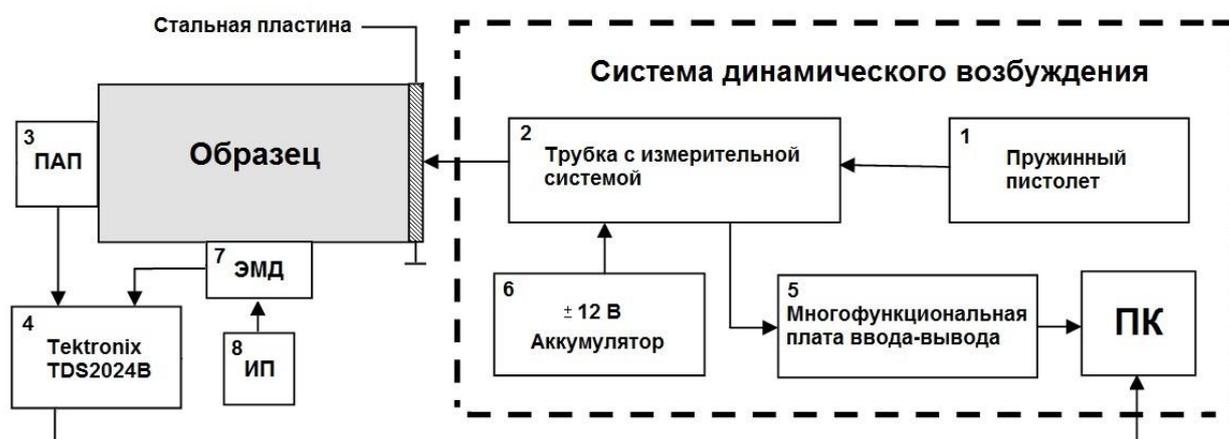


Рисунок 2. Блок-схема системы динамического возбуждения

На рисунке 2 показано: 1 – пружинный пистолет; 2 – трубка с измерительной системой времени пролета шарика; 3 – ПАП – пьезоакустический приемник; 4 – цифровой двухканальный осциллограф Tektronix TDS 2024B с возможностью запоминания сигналов и передачи их на компьютер. Полоса пропускания прибора равна 60 МГц, чувствительность 2 мВ/дел; 5 – с помощью многофункциональной платы ввода-вывода; 6 – аккумулятор с питанием ± 12 В; 7 – ЭМД – электромагнитный дифференциальный датчик, со встроенным усилителем мощности для согласования входного сопротивления емкостного датчика и принимающего сигнал электронного усилителя с коэффициентом усиления 100; 8 – источник питания электронной схемы ЭМД.

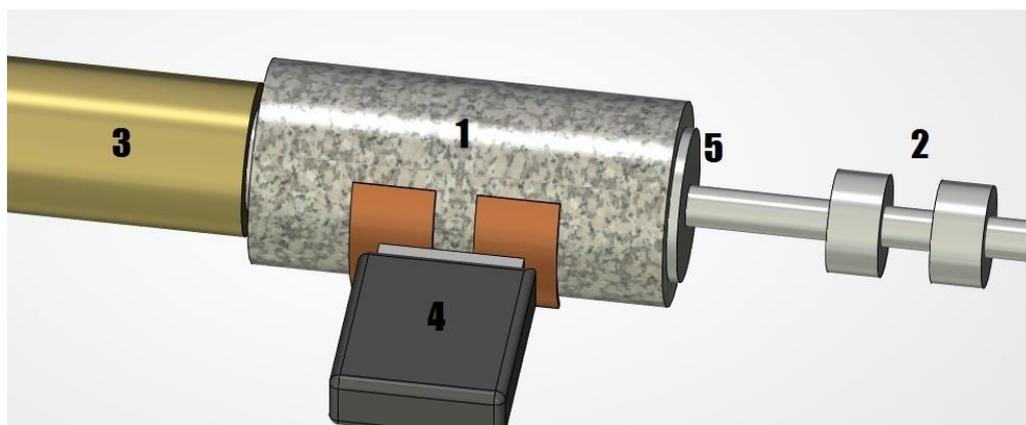


Рисунок 3. Наглядная схема системы динамического возбуждения

На рисунке 3 в образец (1) через заземленную металлическую пластину (5) и иммерсионный слой минерального масла пружинной механической системой, использующей стальной шарик, вводился акустический импульс. Проходя через образец, акустический сигнал регистрировался пьезоакустическим приемником (3). Сигнал с (3) служил для запуска осциллографа и записывался на его экране. Генерируемый при прохождении акустического сигнала ЭМС регистрировался емкостным дифференциальным датчиком (4), который принимал электрическую составляющую ЭМС. С электромагнитного датчика усиленный ЭМС поступал на осциллограф Tektronix TDS 2024В. Далее ЭМС и АС с осциллографа передавались на компьютер ПК, где производилась их дальнейшая обработка и анализ. Длительность и амплитуда акустического сигнала на ударное воздействие проводились с использованием стального шарика массой $0,86 \cdot 10^{-3}$ кг, что соответствовало длительности фронта акустического возбуждения $14 \cdot 10^{-6}$ с.

Для определения энергии акустического возбуждения использовалась трубка с системой измерения времени пролета шарика схема, которой представлена на рисунке 4.

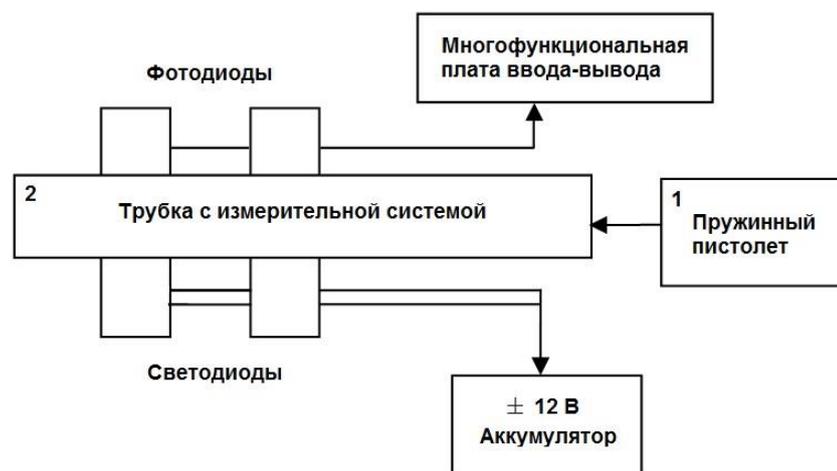


Рисунок 4. Трубка с измерительной системой времени пролета шарика

Трубка устанавливалась перпендикулярно поверхности образца. При пролете шарика, сигнал с системы измерения, поступал на многофункциональную плату ввода-вывода, и в дальнейшем с помощью программы LabView обрабатывался и выводился на экран ПК. В трубке с измерительной системой (2) имеются отверстия, в которые вставлены две оптопары фотодиод-светодиод. Шарик, пролетая по трубке, закрывает отверстия и со светодиода свет не проходит на фотодиод. В результате, при пролете шарика первой и второй оптопар на многофункциональную плату ввода-вывода, а затем на экран ПК, поступают электрические импульсы, расстояние между которыми соответствует времени пролета шарика между оптопарами. На компьютере с помощью программы LabView измерялось время пролета. Расстояние между оптопарами l равно 0,05 м. Зная время пролета шарика Δt_1 и расстояние между оптопарами l , можем вычислить скорость шарика:

$$V_1 = \frac{l}{\Delta t_1}. \quad (1)$$

Вторая пара импульсов, позволяла судить о скорости шарика после отскока от поверхности образца:

$$V_2 = \frac{l}{\Delta t_2}. \quad (2)$$

Зная скорость шарика в момент удара и после отскока от образца, а также массу шарика m , в приближении упругого соударения об образец, можно оценить энергию, передаваемую при соударении образцу по формуле:

$$E = \frac{mV^2}{2} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2}. \quad (3)$$

2.3 Методика исследования влияния электрического и магнитных полей на параметры электромагнитных сигналов образцов горной породы при динамическом возбуждении

В предыдущей главе в качестве внешнего воздействия на двойные электрические слои в горных породах использовали акустические импульсы, возбуждаемые с помощью удара шариком. Но в работах [83,84] показано, что на параметры электромагнитных сигналов гетерогенных структур могут оказывать существенное влияние внешние электрические и магнитные поля. Исследование такого влияния важно как для определения закономерностей изменения параметров ЭМС, так и для поиска дефектов в горных породах и других гетерогенных диэлектрических и ферромагнитных материалах. Методически эти исследования выполнялись по следующим схемам, приведенным на рисунках 5 и 6. В эксперименте использовалось два внешних фактора, влияющих на амплитудно-частотные характеристики электромагнитных сигналов горных пород: внешнее постоянное электрическое или магнитное поле; внешний детерминированный акустический импульс.

Исследования закономерностей изменения параметров ЭМС образцов горной породы от влияния постоянного магнитного поля проводились на стенде, предназначенном для динамического возбуждения ЭМС посредством удара шариком образцов горной породы (данная методика описана в главе 2.2). Блок-схема стенда приведена на рис.5. Функционально установка работает следующим образом. С помощью струбины образец зажимается между измерительной трубкой скорости пролета ударного шарика (2) и пьезоэлектрическим приемником акустических сигналов ПАП (пьезоакустический приемник) (3). Между измерительной трубкой и образцом помещается экранирующая пластина толщиной 2,5 мм. Возбуждение акустических импульсов ударом шарика производилась с помощью системы динамического возбуждения (СДВ). Для определения влияния постоянного магнитного поля на параметры ЭМС к образцу прикладывалось постоянное магнитное поле разной напряженности. Для создания внешнего магнитного поля использовали постоянный неодим-феррум-боровый (NdFeB) магнит размером $(18 \times 16 \times 50)$ мм³, который располагали вдоль оси образца. Напряженность магнитного поля при нулевом отдалении магнита от образца составляла $2,3 \times 10^5$ А/м.

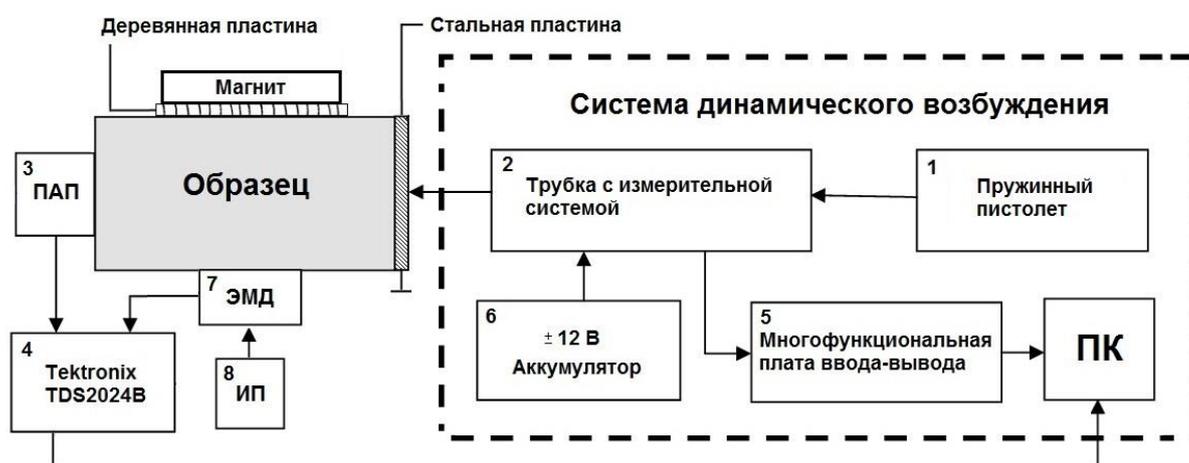


Рисунок 5. Блок-схема системы динамического возбуждения при воздействии внешнего постоянного магнитного поля

Исследования закономерностей изменения параметров ЭМС образцов горной породы от влияния постоянного электрического поля проводились на

стенде, предназначенном для динамического возбуждения ЭМС посредством удара шариком образцов горной породы (данная методика описана в главе 2.2). Блок-схема стенда приведена на рис.6. Она отличается лишь тем, что источником напряжения через изолированные металлические пластины подавалось электрическое напряжение от 0 до 120 В.

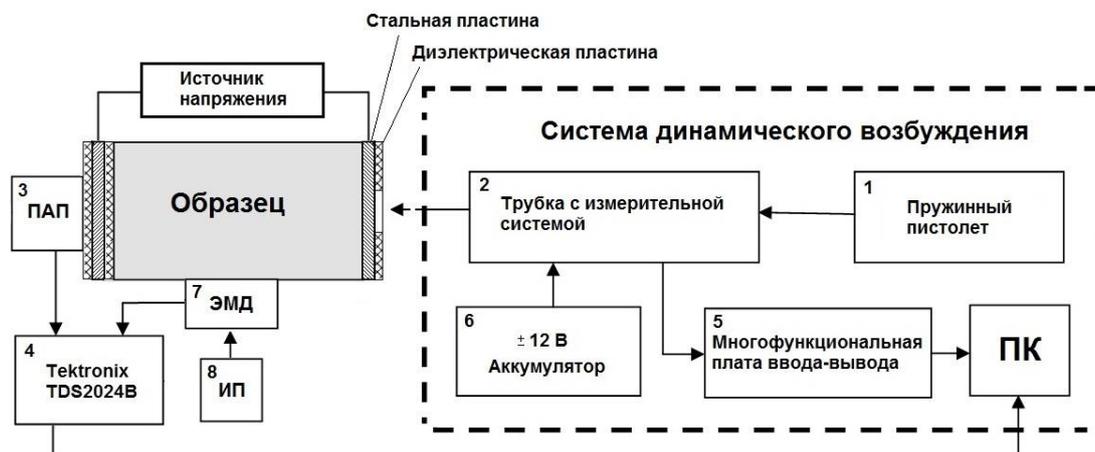


Рисунок 6. Блок-схема системы динамического возбуждения при воздействии внешнего постоянного электрического поля

2.4 Объект исследования

Исследуемые образцы реальных горных пород были отобраны на Таштагольском железорудном месторождении. Образцы вырезались из керна материала и имели форму цилиндра диаметром 42 мм и высотой 80 мм (рис.7). Перед проведением исследований торцевые стороны образца шлифовались до плоскопараллельности. Это обеспечивало соосность образца и плит пресса и равномерность распределение нагрузки на торцевую поверхность образца при квазистатическом нагружении.



Рисунок 7. Образцы горной породы

В таблице 1 приведены петрографические данные исследуемых образцов при статическом воздействии, а в таблице 2 при динамическом.

Таблица 1

№ образца	Масса образца, г	Плотность образца, г/см ³	Объем образца, см ³	Содержание магнетита в образце, %	Предел прочности на сжатие, кН
4	456	4,15	110	66	167
5	399	3,66	109	43	261
7	384	3,52	109	36	120
10	401	3,68	109	44	273
13	434	3,98	109	59	131
16	463	5,45	104	78	213

Таблица 2

№ образца	Масса образца, г	Плотность образца, г/см ³	Объем образца, см ³	Содержание магнетита в образце, %
33	342	3,11	110	-
48	504	4,58	110	83

Масса магнетита в образцах была рассчитана по формуле 4:

$$m_{\text{магнетита}} = \rho_{\text{магнетита}} \times V_{\text{образца}} \times \left(1 - \frac{(\rho_{\text{образца}} - \rho_{\text{магнетита}})}{(\rho_{\text{вмещ. породы}} - \rho_{\text{магнетита}})}\right). \quad (4)$$

где $m_{\text{магнетита}}$ – масса магнетита, г; $\rho_{\text{магнетита}}$ – плотность магнетита, г/см³; $V_{\text{образца}}$ – объем образца, см³; $\rho_{\text{образца}}$ – плотность образца, г/см³; $\rho_{\text{вмещ. породы}}$ – плотность вмещающей породы, г/см³.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга). Можно применять географический, демографический, поведенческий и иные критерии сегментирования рынка потребителей, возможно применение их комбинаций с использованием таких характеристик, как возраст, пол, национальность, образование, любимые занятия, стиль жизни, социальная принадлежность, профессия, уровень дохода. В зависимости от категории потребителей (коммерческие организации, физические лица) необходимо использовать соответствующие критерии сегментирования.

Например, для коммерческих организаций критериями сегментирования могут быть: месторасположение; отрасль; выпускаемая продукция; размер и др. Из выявленных критериев целесообразно выбрать два наиболее значимых для рынка. На основании этих критериев строится карта сегментирования рынка.

В данной работе сегментировать рынок услуг по исследованию механоэлектрических преобразований в горных породах при изменении

напряжённно-деформированного состояния можно по следующим критериям: размер компании и характеристики исполнительного органа (рисунок 18).

		Характеристики УДМ		
		маленькие габариты	высокая точность	большой ресурс
размер компании	крупные			
	средние			
	мелкие			

АО "НЦП ВостНИИ"
 НИЦ "Горный Эксперт"
 НИТУ "МИСиС"



Рисунок 18. Карта сегментирования рынка услуг по разработке исполнительных органов

В приведенной карте сегментирования показано, какие ниши на рынке услуг по разработке исполнительных органов не заняты конкурентами. Из данной карты можно сделать вывод, что нет фирм мелких размеров и средних фирм, исполнительные органы которых имели бы маленькие габариты и большой ресурс работы.

Основными сегментами являются малые габариты исполнительного органа и высокая точность работы.

Данное предприятие будет ориентироваться на все три показателя.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов. С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Анализ проводится с помощью оценочной карты (табл. 3).

Для оценки были выбраны три фирмы-конкурента, которые были представлены на рис. 18.

Б_{к1} - АО "НЦП ВостНИИ"

Б_{к2} - НИЦ "Горный Эксперт"

Б_{к3} - НИТУ "МИСиС"

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы				Конкурентоспособность			
		Бф	Бк1	Бк2	Бк3	Кф	Кк1	Кк2	Кк3
Технические критерии оценки ресурсоэффективности									
1. Повышение производительности труда пользователя	0.05	4	4	4	4	0.2	0.2	0.2	0.2
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0.15	5	5	3	4	0.75	0.75	0.65	0.6
3. Помехоустойчивость	0.1	5	5	3	4	0.5	0.5	0.3	0.4
4. Энергоэкономичность	0.1	5	5	4	5	0.5	0.5	0.4	0.5
5. Надежность	0.1	4	4	3	4	0.5	0.5	0.3	0.4

Продолжение таблицы 3

6. Уровень шума	0.1	5	5	5	5	0.5	0.5	0.5	0.5
7. Безопасность	0.1	5	5	5	5	0.5	0.5	0.5	0.5
8. Потребность в ресурсах памяти	0.05	1	1	1	1	0.05	0.05	0.05	0.05
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.05	4	4	3	4	0.2	0.2	0.15	0.2
10. Простота эксплуатации	0.1	5	5	5	5	0.5	0.5	0.5	0.5
11. Качество интеллектуального интерфейса	0.05	5	5	3	4	0.25	0.25	0.15	0.2
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0.05	2	1	1	1	0.1	0.05	0.05	0.05
Экономические критерии оценки эффективности									
1. Конкурентоспособность продукта	0.2	5	5	3	4	1	1	0.7	0.8
2. Уровень проникновения на рынок	0.15	5	5	3	4	0.8	0.8	0.7	0.8
3. Цена	0.2	5	3	4	3	1	0.6	1	0.8
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0.1	4	4	3	3	0.5	0.5	0.3	0.4
5. Послепродажное обслуживание	0.1	4	4	3	3	0.4	0.5	0.3	0.4
6. Финансирование научной разработки	0.05	5	5	3	4	0.25	0.25	0.2	0.2
7. Срок выхода на рынок	0.1	5	5	3	4	0.5	0.5	0.4	0.4
8. Наличие сертификации разработки	0.1	4	4	3	3	0.5	0.5	0.4	0.4
Итого	1	37	36	25	28	4.95	4.55	3.9	4.1

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 3, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле 5:

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (5)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Основываясь на знаниях о конкурентах, следует объяснить:

- чем обусловлена уязвимость позиции конкурентов и возможно занять свою нишу и увеличить определенную долю рынка;
- в чем конкурентное преимущество разработки.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

4.1.3 Технология QuaD

Технология QuaD (QQualityADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно- исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1) Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность;
- правовая защищенность и др.

2) Показатели оценки качества разработки:

- динамический диапазон;

- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации. Для упрощения процедуры проведения QuaD рекомендуется оценку проводить в табличной форме (табл. 4). В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 4. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0.05	80	100	0.8	0.040
2. Помехоустойчивость	0.05	80	100	0.8	0.04
3. Надежность	0.05	80	100	0.8	0.04
4. Унифицированность	0.05	80	100	0.8	0.04
5. Уровень материалоемкости разработки	0.05	70	100	0.7	0.035
6. Уровень шума	0.05	60	100	0.6	0.03
7. Безопасность	0.05	80	100	0.8	0.04
8. Потребность в ресурсах памяти	0.05	50	100	0.5	0.025

Продолжение таблицы 4

9.Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.05	50	100	0.5	0.025
10. Простота эксплуатации	0.05	90	100	0.9	0.045
11. Качество интеллектуального интерфейса	0.05	80	100	0.8	0.04
12.Ремонтопригодность	0.05	90	100	0.9	0.045
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13.Конкурентоспособность продукта	0.05	80	100	0.8	0.04
14.Уровень проникновения на рынок	0.05	50	100	0.5	0.025
15.Перспективность рынка	0.05	50	100	0.5	0.025
16.Цена	0.05	80	100	0.8	0.04
17.Послепродажное обслуживание	0.05	50	100	0.5	0.025
18.Финансовая эффективность	0.05	50	100	0.5	0.025
19.Срок выхода на рынок	0.05	50	100	0.5	0.025
20.Наличие сертификации разработки	0.05	50	100	0.5	0.025
Итого	1	1050	2000	0.525	0.26

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле 6:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i \quad (6)$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Если значение показателя P_{cp} получилось от 100 до 80, то такая разработка считается перспективной. Если от 79 до 60 – то

перспективность выше среднего. Если от 69 до 40 – то перспективность средняя. Если от 39 до 20 – то перспективность ниже среднего. Если 19 и ниже – то перспективность крайне низкая. По результатам оценки качества и перспективности делается вывод об объемах инвестирования в текущую разработку и направлениях ее дальнейшего улучшения. Технология может использоваться при проведении различных маркетинговых исследований, существенным образом снижая их трудоемкость и повышая точность и достоверность результатов.

4.1.4 SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

1. Сильные стороны. Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован. При этом рекомендуется задавать следующие вопросы:

- Какие технические преимущества вы имеете по сравнению с конкурентами?
- Что участники вашего проекта умеют делать лучше всех?

- Насколько ваш проект близок к завершению по сравнению с конкурентами?

2. Слабые стороны. Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами. Чтобы прояснить в каких аспектах вас, возможно, превосходят конкуренты, следует спросить:

- Что можно улучшить?
- Что делается плохо?
- Чего следует избегать?

3. Возможности. Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию. Формулирование возможностей проекта можно упростить, ответив на следующие вопросы:

- Какие возможности вы видите на рынке?
- В чем состоят благоприятные рыночные возможности?
- Какие интересные тенденции отмечены?
- Какие потребности, пожелания имеются у покупателя, но не удовлетворяются конкурентами?

4. Угроза. Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой

проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту. Для выявления угроз проекта рекомендуется ответить на следующие вопросы:

- Какие вы видите тенденции, которые могут уничтожить ваш научно-исследовательский проект или сделать его результаты устаревшими?
- Что делают конкуренты?
- Какие препятствия стоят перед вашим проектом (например, снижение бюджетного финансирования проекта, задержка финансирования проекта и т.п.)?
- Изменяются ли требуемые спецификации или стандарты на результаты научного исследования?
- Угрожает ли изменение технологии положению вашего проекта?
- Имеются ли у руководства проекта проблемы с материально-техническим обеспечением?

Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в табличной форме (табл. 5).

Таблица 5 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	<p>С1.Экономичность и энергоэффективность технологии проектирования.</p> <p>С2.Экологичность технологии проектирования.</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Высокая точность</p> <p>С5. Малые габариты</p> <p>С6. Более большой ресурс работы</p> <p>С7.Наличие прототипа научной разработки</p>	<p>Сл.1.Дефицит квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p> <p>Сл.2. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ.</p> <p>Сл.3.Дорогая стоимость оборудования для проведения испытания опытного образца.</p> <p>Сл.4. Большой срок поставок материалов и комплектующих.</p> <p>Сл.5.Отсутствие финансирования</p>

Продолжение таблицы 5

<p>Возможности:</p> <p>В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В2.Использование инфраструктуры ОАО «НИИПП» г.Томск .</p> <p>В3.Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В4.Повышение характеристик прибора.</p> <p>В5.Понижение цены, низкая стоимость прибора по сравнению с конкурентами.</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на товары нового предприятия</p> <p>У2.Развитая конкуренция технологий производства</p> <p>У3.Отказ в финансировании или несвоевременное финансовое обеспечение</p> <p>У4.Быстрое развитие технологий в стране, вследствие чего данные исследования могут стать устаревшими.</p>		

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Факторы помечаются либо знаком «+» (означает сильное соответствие

сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Пример интерактивной матрицы проекта представлен в табл. 6.

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта								
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	B1	+	+	+	+	+	+	-
	B2	+	0	+	+	+	+	-
	B3	+	+	-	+	+	+	-
	B4	+	-	-	+	-	+	+
	B5	-	-	+	-	-	-	-

Сильны коррелирующие стороны и возможности: B1 C1 C2 C3 C4 C5 C6; B2 C1 C3 C4 C5 C6; B3 C1 C2 C4 C5 C6; B4 C1 C4 C6 C7; B5 C2.

Возможности B1, B2, B3 и B5 коррелируют с одними и теми же сильными сторонами C1 и C3, отсюда можно сделать вывод об общей природе этих факторов.

В рамках третьего этапа была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приведена в таблице 7 .

Таблица 7 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>С2. Экологичность технологии.</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Высокая чувствительность</p> <p>С5. Малые габариты</p> <p>С6. Более большой ресурс работы</p> <p>С7. Наличие прототипа научной разработки</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл.1. Дефицит квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p> <p>Сл.2. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ.</p> <p>Сл.3. Дорогая стоимость оборудования для проведения испытания опытного образца.</p> <p>Сл.4. Большой срок поставок материалов и комплектующих.</p> <p>Сл.5. Отсутствие финансирования</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В2. Использование инфраструктуры ОАО «НИИПП» г. Томск .</p> <p>В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В4. Повышение характеристик прибора.</p> <p>В5. Понижение цены, низкая стоимость прибора по сравнению с конкурентами.</p>	<p>Из интерактивной матрицы можно сделать вывод о связи сильных сторон С1 и С3 с возможностями В1, В2, В3 и В5, что весьма логично. Низкая стоимость товара повлечет за собой спрос на продукт, а экономичность позволит изготавливать продукт с использованием инфраструктуры ТПУ и НИИПП.</p>	<p>При изготовлении продукта, при использовании инфраструктур ТПУ и НИИПП можно столкнуться с проблемой нехватки опытных кадров, а также прототипа научной разработки. Проблему с кадрами можно решить путем обучения уже имеющихся кадров. Вместо прототипа разработки можно провести необходимые работы и эксперименты с купленным аналогом.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на товары нового предприятия</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства</p> <p>У3. Отказ в финансировании или несвоевременное финансовое обеспечение</p> <p>У4. Быстрое развитие технологий в стране, вследствие чего данные исследования могут стать устаревшими.</p>	<p>Во избежание отказа в финансировании, нужно доказать экономичность изготовления прибора, а также удостовериться в его спросе на рынке. Для борьбы с конкурентами нужно, чтобы продукт удовлетворял высоким требованиям качества, но при низкой цене.</p>	<p>Отсутствие финансирования приведет к тому, что не будет разработан прототип научной разработки. Но как было выше сказано, можно использовать аналог данного продукта, максимально схожего с характеристиками, полученными теоретическим путем, собственного продукта</p>

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Помишин Е.К., Яворович Л.В. Исследование механоэлектрических преобразований в образцах горных породах при статическом и акустическом взаимодействии. Неразрушающий контроль: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». В 2 т. Т.1/Томский политехнический университет. - Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2015.- 386 с. С. 123-126.

2. L. Yavorovich, A. Beshpal'ko, P. Fedotov, E. Pomishin. Study of interrelation between electromagnetic radiation and rock strength. RTEP 2015 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering110 (2016) 012085 DOI:10.1088/1757-899X/110/1/012085.

3. E. Pomishin, L. Yavorovich. Review of Studies of Mechanoelectrical Transformations in Rocks in Russia and Abroad . IV International Conference on Modern Technologies for Non-Destructive Testing IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering132 (2016) 012024 DOI:10.1088/1757-899X/132/1/012024.

4. L. Yavorovich, A. Beshpal'ko, E. Pomishin, P. Fedotov. Studying Electromagnetic Signal of Rock Effected by Acoustic Impact under Uniaxial Compression. AIP Conference Proceedings, Vol. 1772, 13 October 016, 040008 DOI: 10.1063/1.4964567.

5. A.Beshpal'ko, L.Yavorovich, P. Fedotov, E. Pomishin, M. Vedyashkin. Application of an integrated and self-contained electromagnetic acoustic recorder for monitoring the rock mass structure and development of geodynamic processes in ore mines. MATEC Web of Conferences 79, 01039 (2016) IME&T 2016 DOI: 10.1051/matecconf/20167901039

6. Помишин Е.К., Яворович Л.В. Исследования механоэлектрических преобразований в образцах горных пород Таштагольского железорудного месторождения. Перспективы развития фундаментальных наук [Электронный

ресурс]: сборник трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Россия, Томск, 26-29 апреля 2016/ под ред. И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой. - Томск: Изд-во – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. Режим доступа: http://science-persp.tpu.ru/Arch/Proceedings_2016_vol_1.pdf – 349с. С.232-235.

7. Помишин Е.К., Яворович Л.В. Экспериментальные исследования механоэлектрических преобразований образцов магнетитовой руды. Неразрушающий контроль: сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». В 3 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 473 с. С. 261-265.