

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

**Соколов Семен Тарасович**



**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ ПРОХОДКЕ ТРАНШЕИ В ЗОНЕ  
ДЕЙСТВУЮЩЕГО ГАЗОПРОВОДА**

Специальность – 25.00.20 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная  
аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель**  
кандидат технических наук,  
доцент С.В. Хохлов

Санкт-Петербург – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. ОЦЕНКА НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ВБЛИЗИ ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ</b> .....	11
1.1. Анализ негативных последствий применения буровзрывных работ .....	11
1.2. Сейсмостойкость подземных газопроводов .....	14
1.3. Закон продольного взаимодействия породы и подземного газопровода.....	19
1.4. Методы снижения сейсмического эффекта на охраняемые объекты от действия взрыв.....	23
1.5. Исследования и оценка сейсмического воздействия на охраняемые объекты	30
1.6. Выводы по главе 1 .....	35
<b>ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН</b> .....	37
2.1. Предпосылки к проведению исследований по определению влияния параметров БВР на изменение частоты колебаний СВВ .....	37
2.2. Методика проведения исследования.....	37
2.3. Исследование зависимости сейсмических колебаний грунта от параметров проведения БВР .....	42
2.4. Выводы по главе 2.....	48
<b>ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ ИХ РЕГИСТРАЦИИ</b> .....	50
3.1. Условия проведения экспериментальных исследований по определению сейсмобезопасных параметров БВР при проходке траншеи вдоль газопровода в Ленинградской области .....	50
3.1.1. Климатические и геологические условия ведения БВР .....	50
3.1.2. Технологические условия ведения БВР.....	52
3.2. Распределение сейсмозрывных волн с увеличением глубины залегания охраняемого объекта.....	55
3.3. Проведение тарировки акселерометров.....	59

3.4. Порядок проведение измерений .....	64
3.5. Обработка полученных результатов от экспериментальных взрывов .....	68
3.6. Выводы по главе 3.....	73
<b>ГЛАВА 4. ОЦЕНКА НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЕ ПРОТЯЖЕННОСТИ ВЗРЫВАЕМОГО БЛОКА НА ОХРАНЯЕМЫЙ ОБЪЕКТ .....</b>	<b>76</b>
4.1. Расчетная оценка сейсмического воздействия на газопровод.....	76
4.2. Изучение влияния протяженности взрываемого блока на параметры сейсмозрывной волны.....	79
4.3. Выводы по главе 4.....	86
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>87</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>89</b>
<b>СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА.....</b>	<b>105</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность работы**

Несмотря на возникший в настоящее время общемировой экономической кризис, газотранспортная система России продолжает неуклонно развиваться, как на внутреннем рынке, так и наращивать темпы экспорта углеводородов в различные страны. Так за последнее десятилетие по данным Росстата экспорт газа увеличился с 177 миллиардов тонн в год в 2010 году, до 221 миллиарда тонн в 2019 году.

По данным Министерства Энергетики Российской Федерации, прогнозирующей долю потребления газа на десятилетия вперед, потребность в газе для нашей страны останется актуальной и к 2035 году составит 52-53% от общего числа топливно-энергетического баланса. Для обеспечения этих показателей, необходимо постоянное усовершенствование газотранспортной системы. Вот лишь некоторые проекты, реализуемые компанией «Газпром» в настоящее время: Мегапроект «Ямал», Восточная газовая программа, Северный поток 1 и 2, Турецкий поток, а также Сила Сибири. Реализация таких проектов по укладке подземных газопроводов лежит в определенных временных рамках. Для увеличения пропускной способности действующих газопроводов прокладываются дублирующие ветки на расстояниях от 15 до 50 метров. Для этих целей необходим экономически выгодный способ проходки траншеи под новую трубу. В местах, где магистраль газопровода прокладывается в скальных грунтах единственным способом, обеспечивающим необходимые темпы строительства, является применение буровзрывных работ (далее БВР). Ведение БВР при проходке траншей на границе опасной зоны (для прямых участков составляющей 25 м, на участках поворота 50 м) формирует сейсмическое воздействие на действующий газопровод, что может привести к разрушению действующего газопровода или его элементов, утечке транспортируемого продукта при разрушении газопровода, взрыву газовоздушной смеси, повреждению сопутствующей магистральной трассе инфраструктуры. При этом, с точки зрения обеспечения скорости проходки траншей и сокращения количества массовых

взрывов, строители стремятся максимально увеличить размеры взрываемого блока. В то же время, при увеличении размеров блока увеличивается количество ступеней замедления (в одной ступени взрываются не более 3-х скважин), что приводит к усилению сейсмического воздействия на действующий газопровод. В соответствии с действующими правилами и нормами для газопроводов принято оценивать сейсмическую безопасность по максимальному значению скорости смещения по поверхности, равное 50 мм/с. Несмотря на то, что магистральные газопроводы относятся к сооружению высшей категории капитальности и расчет сейсмической безопасности производится на основе увеличенной балльности к сейсмическому воздействию, ведение взрывных работ может оказать значительное негативное воздействие на охраняемый объект. Поэтому необходимо проводить постоянный мониторинг сейсмического воздействия взрыва для каждого участка БВР.

### **Степень разработанности исследования**

Прогнозирование величины сейсмических нагрузок на охраняемые объекты находится под постоянным вниманием специалистов и ученых по всему миру. В нашей стране огромный вклад в исследования проблемы сейсмической безопасности внесли следующие ученые: Азаркович А.Е., Демидюк Г.П. Садовский М.А., Кузьменко Н.А., Медведев С.В., Миронов П.С., Мосинец В.Н., Гриб Н.Н., Эквист Б.В., Совмен В.К., Господариков А.П., а также Артемов В.А., Виноградов Ю.И., Холодилов А.Н. и многие другие.

Многими исследователями использовались аналитические соотношения, основанные на принятии плоского фронта и постоянной амплитуды сейсмозрывной волны (далее СВВ), либо на эмпирически полученных зависимостях. В последнее время набирает популярность 3D - модели, основанные на методах конечных элементов, из-за их относительной простоты и эффективности. Некоторые усилия были предприняты для поиска аналитических решений проблем сейсмического воздействия взрыва, но такие методы настолько сложны, что приходится рассмотреть несколько упрощающих допущений. Многие нормативные документы по безопасному воздействию на подземный

газопровод от действия взрыва придерживаются значений скорости смещения грунта на поверхности равному 50 мм/с. для пиковой скорости частиц. Однако считается, что стальная труба – прочная конструкция по сравнению со зданием; также существует инерционный эффект рассеивания СВВ за счет грунта подложки газопровода, снижающий негативное воздействие СВВ. Проведя опытно-промышленные испытания на различных строительных объектах, можно сделать вывод: Полученные в ходе замеров данные о безопасных расстояниях значительно отличаются, от величин, рассчитанных по нормативным документам. Таким образом, единственным надежным способом оценки сейсмического действия взрыва можно считать проведение прямых натурных измерений.

В тексте диссертационной работы представлены экспериментальные и аналитические данные, полученные в ходе экспериментальных исследований и при мониторинге буровзрывных работ, проводившихся в северо-западной части Ленинградской области. Основным местом проведения экспериментальных исследований стало строительство дополнительной ветки Североевропейского газопровода, в сотрудничестве с компанией ООО «ЕВРОВЗРЫВПРОМ». Результатами можно считать: установление зависимости частотных характеристик сейсмической волны от массы одновременно взрываемого заряда; установление зависимости амплитудных значений СВВ от глубины залегания магистрального газопровода; изменение значения пиковой скорости смещения при увеличении протяженности взрываемого блока.

**Цель работы** – разработка способа прогнозирования амплитудных значений скорости СВВ, воздействующих на подземный газопровод, при ведении буровзрывных работ с применением протяженных блоков, используя данные, полученные сейсмостанциями, установленными на поверхности.

**Основная идея** заключается в использовании и интерпретации данных натурных сейсмических измерений для выявления связи параметров буровзрывных работ с особенностями распространения СВВ.

### **Основные задачи исследования**

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта ведения взрывных работ в стесненных условиях.
2. Исследование частотных характеристик колебаний грунта в сейсмозрывной волне, как фактора, влияющего на разрушающую способность волны.
3. Исследования изменения амплитудных значений скорости СВВ с увеличением глубины регистрации сигнала и протяженности взрываемого блока.

### **Методология и методы исследования**

При выполнении диссертационной работы использовались анализ и научное обобщение исследований характеристик сейсмозрывного эффекта от действия взрыва. Экспериментальные исследования по определению СВВ от группы скважинных зарядов, при вариации их протяженности и глубины регистрации сигнала, а также рельефа местности проводились в лабораторных, полигонных и производственных условиях. Для анализа результатов экспериментальных исследований применялись современные методы математической обработки данных.

### **Научная новизна**

1. Установлена зависимость частотных характеристик сейсмических колебаний от массы одновременно взрываемого заряда при проходке траншей.
2. Установлены зависимости амплитудных значений ускорения СВВ на различных расстояниях до газопровода, глубине регистрации сигнала, протяженности взрываемого блока.

### **Основные защищаемые положения**

1. Частоты максимумов скорости смещения колебаний грунта в сейсмозрывной волне, являются функцией массы одновременно взрываемого заряда: с увеличением массы заряда частота максимума уменьшается.
2. Амплитудные значения ускорения колебаний точки регистрации под действием сейсмозрывной волны в зависимости от глубины, их регистрации,

определяются показаниями поверхностных датчиков по зависимости вида  $A_H = A_0 e^{-0,7H}$ .

3. При взрывании удлиненных блоков, когда расстояние от точки регистрации до взрываемых зарядов в два и более раз меньше длины самого блока, расчетные значения скорости смещения сейсмозрывной волны должны быть увеличены на коэффициент соответствующей протяженности блока (при относительном расстоянии  $R_{отн} = 2, K=1,3$ ;  $R_{отн} = 3, K=1,5$ ;  $R_{отн} = 5, K=1,7$ ).

### **Практическая значимость работы**

Основные положения и результаты исследований могут быть использованы в проектных организациях и на участках ведения буровзрывных работ проводимых в опасной зоне газопроводов.

Научные и практические результаты диссертации могут быть использованы в учебном процессе при подготовке и повышении квалификации горных инженеров по дисциплинам «Технология и безопасность ведения взрывных работ» и «Физические процессы взрывного разрушения».

### **Теоретическая значимость работы**

Полученные зависимости развивают технологию прогнозирования сейсмического воздействия в ближней и средней сейсмических зонах, дают возможность предсказывать значение скорости СВВ на различных глубинах и при применении протяженных блоков.

### **Апробация работы**

Основные идеи и научные результаты диссертационного исследования были представлены на следующих всероссийских и международных научных конференциях и конкурсах:

1. XLIV международная научно-практическая конференция СибАК, тема доклада: «Анализ современных методов управления энергией взрыва», 2018.

2. Семинар «Специальные методы ведения взрывных работ», Горный университет, тема доклада «Особенности проведения мониторинга взрывных работ при строительстве газопровода», 2019.



3. Международная конференция «Инновационные направления проектирования горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых», Горный университет. Тема доклада: «Определение безопасных условий ведения буровзрывных работ вблизи действующего газопровода», 2020.

**Достоверность научных исследований** обеспечивается применением современных методов исследований; анализом мирового опыта прогнозирования параметров сейсмозрывных волн; представительным объемом данных натурных наблюдений, проведенных с использованием сертифицированного оборудования; удовлетворительной сходимостью результатов натурных и численных исследований.

**Личный вклад** заключается в формулировании цели и задач исследований, проведении анализа технической литературы и мирового опыта прогнозирования сейсмозрывных волн вблизи действующего газопровода. Проведены экспериментально-аналитические и натурные исследования, обобщены результаты, сформулированы защищаемые положения и выводы.

Обработаны результаты натурных экспериментальных исследований параметров сейсмозрывных волн с использованием современных сейсмостанций. Разработан алгоритм выбора параметров БВР, исключающий совпадение частот собственных колебаний действующего газопровода и частот колебаний, возникающих на границе (грунт-труба) при проведении буровзрывных работ.

Проведены численные исследования зависимости протяженности взрываемого блока на параметры сейсмозрывной волны. Представлено обоснование измерения параметров сейсмозрывных волн на поверхности для прогнозирования сейсмозрывных колебаний на глубине заложения подземного газопровода.

**Публикации** в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе 2 статьи – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (далее – Перечень ВАК), 2 статьи – в

изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus/ Web of Science). Получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 150 наименований, и списка иллюстративного материала. Диссертация изложена на 107 страницах машинописного текста и содержит 45 рисунков и 14 таблиц.

### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю доценту Хохлову С.В. за постоянное внимание и помощь при написании работы, доценту Виноградову Ю.И. за организацию экспериментальных работ и ценные практические советы при интерпретации результатов, а также доцентам Артемову В.С. и Холодильову А.Н. за подробные консультации.

## ГЛАВА 1. ОЦЕНКА НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ВБЛИЗИ ОХРАНЯЕМЫХ

### 1.1. Анализ негативных последствий применения буровзрывных работ

Применение взрывных технологий в промышленности и на строительных объектах, продолжает держать лидирующие позиции, по сравнению, с иными технологическими процессами, выемки горной массы. Основными причинами такой популярности, можно назвать экономичность и скорость выполнения работ. На данном этапе модернизация технологии буровзрывных работ направлена на увеличение производительности, снижение негативного влияния на окружающую среду и повышение безопасности. К производительности можно отнести степень желаемого равномерного дробления или откола кусков необходимого размера, а также правильное смещение пород. Негативные последствия взрыва на окружающую среду разделяются на ударно-воздушную волну (УВВ), выделение пыли и ядовитых газов, разлет кусков породы, а также сейсмические волны (рисунок 1.1).

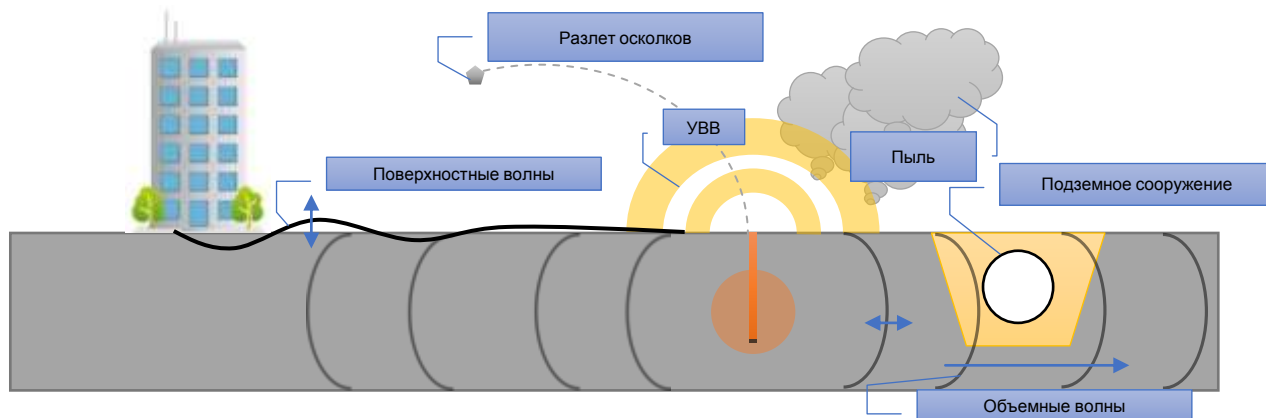


Рисунок 1.1 – Влияние БВР на окружающую среду

На данный момент времени актуальной остается проблема обеспечения сейсмической безопасности объектов, попадающих в зону ведения буровзрывных работ. Все большее количество научных работ посвящается изучению сейсмической безопасности, в частности снижению уровня сейсмического воздействия, а также методам прогнозирования параметров и контроля сейсмической волны [7, 19, 30].

Одним из важнейших примеров таких работ является использование буровзрывных технологий при проходке скальных пород для устройства траншеи под газопровод вблизи существующих конструкций. Исходя из настоящих реалий, газотранспортная система нашей страны неуклонно развивается. В этой связи происходит как строительство новых магистралей, так и увеличение пропускных способностей уже действующих маршрутов поставки газа, за счет строительства дублирующих веток. Зачастую рельеф местности, сложные горно-геологические условия и экономический фактор обуславливают применение буровзрывной технологии проходки траншей. Не смотря на положительные стороны данной технологии: сравнительная экономичность, относительно высокая скорость проходки, применение её влечет и различные негативные воздействия на массив пород и расположенные поблизости охраняемые объекты.

В следствии перехода взрывчатого вещества, под действием высоких температур, в газообразное состояние, за малый промежуток времени выделяется огромное количество энергии [78]. Образовавшиеся в результате химической реакции взрывчатого превращения газообразные продукты (далее ГП), несущие в себе запас кинетической энергии, воздействуют на среду, в которой распространяются, и в результате своего расширения, генерируют волны различного характера [65].

Давление, создаваемое на фронте детонационной волны  $P_D$  (Па) определяется, основываясь на гидродинамической теории и может быть вычислено по формуле (1.1) [11]:

$$P_D = \frac{\rho_{ВВ} D_D^2}{(n_{ВВ} + 1)} 33 \quad (1.1)$$

где  $\rho_{ВВ}$  – плотность ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  $D_D$  – скорость детонации, м/с;  $n_{ВВ}$  – показатель политропы продуктов взрыва, для современных промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) принимается равной 2 – 3 в зависимости от плотности и скорости детонации ПВВ [3, 5]

Процесс резкого адиабатического расширения продуктов взрыва (ПВ), при котором тепловая энергия переходит в механическую работу, в результате

которой происходит разрушение, дробление и перемещение среды окружающей ВВ принято называть работой взрыва. В работу взрыва переходит примерно 70 % потенциальной энергии ВВ, при этом коэффициент полезного действия взрыва невелик и варьируется в диапазоне от 1 до 15% [65].

Невысокий коэффициент полезного действия можно объяснить наличием различного рода потерь, именно из-за них, в реальных условиях полезная механическая работа ВВ, всегда значительно меньше общей потенциальной энергии [9, 11, 35, 48]. «Баланс энергии взрыва в виде поточной диаграммы представлен на рисунке 1.2.

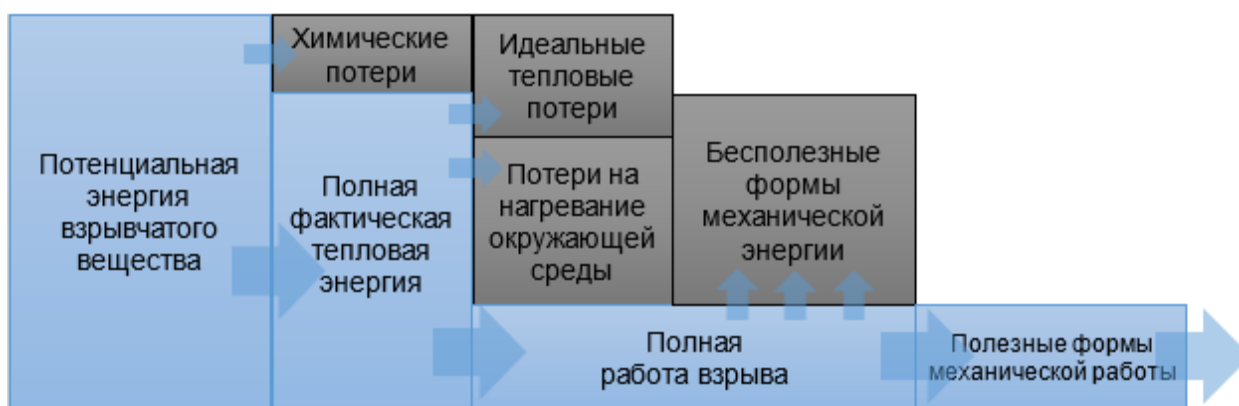


Рисунок 1.2 – Баланс энергии взрыва

(по М.А. Садовскому и А.Ф. Беляеву) [11]

Из диаграммы видно, что если исключить из рассмотрения химические и тепловые потери, то выделяемая при взрывчатом превращении энергия переходит в механическую, в которой можно выделить полезную и бесполезную [73].

К полезной форме механической работы взрыва в настоящий момент принято относить: смятие породы, прилегающей к заряду; сжатия породы и пластические деформации; дробление, вокруг зарядной полости, некоторого объема горной породы; взрывное перемещение разрушенной породы на определенное расстояние; формирование воронки или кумулятивной полости» [11].

На основании всего вышесказанного можно составить классификацию негативных последствий применения буровзрывной технологии для окружающей среды и человека. «Согласно этой классификации (рисунок 1.1), к негативным

последствиям применения буровзрывной технологии при строительстве траншей для прокладки газопроводов можно отнести:

1. Неконтролируемый разлет кусков взорванной породы;
2. Возникновение сейсмозрывной волны.
3. Возникновение ударно-воздушной волны;
4. Выброс вредных газообразных веществ и аэрозолей в окружающую среду» [11].

Примеры негативных последствий применения буровзрывных технологий приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Негативные последствия применения БВР

Влияние на человека	Отравление и развитие проф. заболеваний, поражение органов слуха, вестибулярного аппарата и т.п. Травмирование осколками.
Влияние на экологию	Негативное воздействие на флору Влияние на миграцию фауны Изменение водного состава и мест нереста ценных пород рыб.
Влияние на инфраструктуру, попадающую в зону проведения БВР	Полное или частичное разрушение конструкций Повреждение фундаментов Нарушение остекления

На сегодняшний день существуют методики, позволяющие в значительной мере снизить, а в некоторых случаях и свести к минимуму уровень негативных воздействий от применения буровзрывных технологий.

### 1.2. Сейсмостойкость подземных газопроводов

Подземные газопроводы, по которым транспортируются углеводороды в жидком и газообразном состоянии, являются чрезвычайно важными инженерными коммуникациями во всем мире [32, 54, 83, 129]. Это обстоятельство требует надежного обеспечения сейсмической безопасности подземных газопроводов [83, 32, 54, 129].

Сейсмическая безопасность или сейсмостойкость (прочность при сейсмическом воздействии) подземных газопроводов активно начала изучается с середины XX века [132].

Теории сейсмостойкости подземных газопроводов основаны на данных, собранных при изучении последствий разрушительных землетрясений [126], лабораторных и полевых экспериментальных исследованиях, а также полученных фактах и гипотезах [125, 130, 132, 137].

Суть предложенных гипотез сводится к следующему:

1. При значительном смещении грунта нарушается целостность подземных газопроводов, что приводит к различным разрушениям: разрушение самого магистрального газопровода, в стыковых соединениях, отрыв газопровода от подстилающих грунтов; отрыв грунта от газопровода на поверхностях их соприкосновения и т.д.

2. Сейсмозрывные волны воздействуют на подземные газопроводы через грунт. Поэтому значения этих сил напрямую зависят от физико-механических и деформационных свойств массива, окружающего подземный газопровод.

3. Предположение о бесконечно длинном прямом горизонтальном газопроводе, уложенном в однородных грунтах, упрощает решение проблемы сейсмозрывного воздействия на газопровод. Это предположение используется в большинстве теоретических исследований.

4. Вовремя взрыва СВВ передает напряжения подземным газопроводам через деформацию горной породы, т. е. горная порода деформируется под действием СВВ и заставляет деформироваться подземные газопроводы. Газопроводам наносится наиболее серьезный ущерб, когда вектор сейсмической деформации вызванный СВВ сонаправлен с газопроводом [139].

5. В случае значительных колебаний грунта, абсолютная амплитуда смещения частиц горной породы может достигать 0,1–0,4 м. за период колебаний  $t = 0.05–20$  с.

6. Существует критическое значение относительного смещения поперечного сечения газопровода, ниже которого существует упругая связь между частицами грунта и внешней поверхностью газопровода, контактирующей с грунтом. При значениях относительного смещения, превышающих критическое значение, разрывается упругая связь между газопроводом и грунтом [137].

7. После строительства газопровода из-за явлений сцепления происходит относительная просадка грунта под действием газопровода, на контактном слое грунта, между подземным газопроводом и грунтом.

Существующие теории сейсмостойкости подземных газопроводов [90, 129, 130, 132] частично учитывают перечисленные факторы, выявленные многочисленными исследователями при анализе последствий сильных землетрясений и проведении экспериментальных исследований взаимодействия подземного газопровода с грунтом при статических и динамических нагрузках.

Проблема определения или оценки сейсмостойкости подземных газопроводов сводится, так или иначе, к определению напряжений в теле трубы различными методами [103, 129, 130, 132, 146]. Напряженное состояние углубленного газопровода от воздействия СВВ чрезвычайно сложны. Из соображений упрощенного расчета напряжения принято разделять на продольные (действующие вдоль оси газопровода), поперечные (перпендикулярные оси газопровода), изгибные, радиальные, кольцевые и т.д. Многие исследователи отмечали, что наиболее опасным напряжением является продольное [84, 90, 93, 113, 123, 130, 146].

Известно, что напряженное состояние подземного газопровода при сейсмических воздействиях возникает в результате его взаимодействия с окружающей горной породой [129, 130, 132, 27]. Поэтому взаимодействие подземного газопровода с грунтом также делится на продольное и поперечное.

В каждом из типов взаимодействия вышеуказанные факторы могут быть обнаружены при сильных движениях грунта. Продольное взаимодействие подземного газопровода с грунтом проще с механической точки зрения и было изучено более подробно.

Поперечное взаимодействие подземного газопровода с грунтом является более сложным и еще недостаточно изучено. При поперечном взаимодействии газопровода с грунтом газопроводы круглого сечения неоднозначно взаимодействуют с грунтом. Когда круглая секция перемещается в грунте, на передней стороне секции создается большее давление, чем на ее задней стороне.



Боковые поверхности этой секции взаимодействуют с горной породой более сложным образом. До сих пор не изучено, как и по каким законам каждая точка внешней поверхности круга взаимодействует с горной породой. В расчетах сейсмостойкости подземных газопроводов наиболее упрощены обычно принимаются схемы, которые могут быть далеки от реальной ситуации. В [126] рассмотрен алгоритм 3D-анализа, разработанный для решения внешней граничной задачи путем применения комбинированного метода, основанного на включении FEM и интегральной формулы Сомильяны [138].

Однако такие комбинированные методы не были применены для решения проблемы подземного газопровода, подвергшегося сейсмозрывному воздействию.

При определении продольных напряжений в подземных газопроводах используются следующие технические теории:

1. Упрощенная теория, основанная на гипотезе о равенстве продольных деформаций в грунте и газопроводе при продольных сейсмических нагрузках [139].

Эта теория определяет деформацию грунта, рассматриваемую как упругое полупространство, при распространении плоской волны; фронт волны перпендикулярен оси газопровода. Деформация грунта определяется без учета газопровода, т. е. считается, что подземный газопровод не влияет на формирование деформации грунта. Сейсмическая прочность газопровода оценивается по величине продольного напряжения в материале газопровода.

В таком случае возникающее напряжение составляет (1.2):

$$e_g = \frac{v_g}{C_g} \quad (1.2)$$

где  $e_g$  – продольная деформация почвы вдоль оси газопровода,  $v_g$  – скорость частиц породы в продольном направлении и  $C_g$  – скорость распространения продольной волны в почве. В данной теории деформация почвы вдоль оси газопровода приравнивается к деформации самого газопровода (1.3):

$$e_g = e_c \quad (1.3)$$

При известном значении деформации газопровода  $e_c$  – продольное напряжение газопровода определяются из закона Гука, рассматривающего газопровод как упругое тело как (1.4):

$$\sigma_c = e_c E_c \quad (1.4)$$

Здесь следует отметить, что упрощенная теория легла в основу нормативных методов расчета сейсмостойкости не только магистральных подземных газопроводов и других типов газопроводов. В уравнение (1.4) было введено множество поправочных коэффициентов, а несколько параметров были заменены для удобства при использовании проектировщиками-инженерами.

Однако гипотеза (1.3), лежащая в основе упрощенной теории, не правдоподобна. Но с другой стороны, в этом случае расчетным путем получается максимально возможное продольное напряжение газопровода. Гипотеза (1.3) обеспечивает большой запас прочности для заглубленного газопровода. Равенство деформации газопровода и деформации грунта лежит в основе первого, начального этапа разработки теории сейсмостойкости подземных газопроводов.

2. Второй этап в развитии теории привел к созданию динамической теории сейсмостойкости подземных газопроводов (в середине XX века).

В основе этой теории лежат силы взаимодействия газопровода с грунтом, которые возникают из-за разницы напряжений в газопроводе и грунте [139]. В динамической теории гипотеза (1.3) считается ложной. Здесь сейсмическая нагрузка на подземный газопровод действует через грунт и определяется при продольном взаимодействии газопровода с грунтом следующим соотношением (1.5):

$$\tau = K_x u \quad (1.5)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига на поверхности контакта газопровода с грунтом, МПа;  $K_x$  – коэффициент продольного взаимодействия или коэффициент жесткости соединения частиц грунта с наружной поверхностью газопровода, МПа/м;  $u = u_g - u_c$  является относительным смещением, м,  $u_g$  – абсолютное продольное смещение грунта в направлении оси газопровода, м, и  $u_c$  – абсолютное продольное смещение газопровода. Далее, принимая во внимание формулу (1.5) или ее более сложные

версии [139], дифференциал уравнения продольного движения газопровода составляются в одномерных, двумерных и трехмерных выражениях.

Полученные уравнения движения решаются с соответствующими замыкающими уравнениями деформации материала газопровода и уравнениями механики сплошных сред с определенными граничными и начальными условиями. В динамической теории в большинстве случаев проблемы сейсмостойкости сводятся к стационарным задачам теории колебаний. Использование теории стационарных колебаний появляется из-за желания получить простые инженерные решения по сейсмостойкости подземных газопроводов. Аналогичным образом рассматриваются проблемы поперечных, изгибных и крутильных колебаний подземных газопроводов при сейсмических нагрузках. Основным отличием задач динамической теории сейсмостойкости подземных газопроводов от традиционной теории колебаний является наличие силы взаимодействия типа (1.5) в уравнении движения.

Следовательно, достоверность результатов, полученных в соответствии с динамической теорией, полностью определяется надежностью закона взаимодействия (1.5) или аналогичными, более сложными законами.

В целом динамическая теория была и остается значительным достижением в развитии теории сейсмостойкости подземных газопроводов.

### **1.3. Закон продольного взаимодействия породы и подземного газопровода**

Сейсмозрывное воздействие на подземный газопровод вдоль протяженного газопровода, считается известной в динамической теории, взятой в качестве функции  $u_g(x,t)$  и входит в уравнение (1.5). Поскольку длина продольной сейсмической волны может быть значительной (от сотен метров до километра), в большинстве случаев смещение грунта рассматривается только в зависимости от времени  $t$ , а не от пространственной координаты  $x$  в виде функции (1.6) или (1.7) [139].

$$u_g = u_m \sin(\omega t) \quad (1.6)$$

или

$$u_g = u_m \cos(\omega t) \quad (1.7)$$

где  $u_m$  – амплитуда продольного смещения грунта, а  $\omega$  – частота колебаний сейсмической волны.

Значение  $u_m$  определяется по сейсмическим данным инструментальных записей колебания. В зависимости от интенсивности землетрясения и типа грунта его величина достигает 0,1–0,4 м. Когда  $u_g(x,t)$  известно, что смещение участков газопровода  $u_c$  определяется из одномерных уравнений вибрации газопровода; затем определяются продольные деформации и напряжения вдоль трубы.

В данной постановке задачи при определении продольных сейсмических напряжений в подземном газопроводе при продольных сейсмических нагрузках величина напряжений зависит от двух параметров: смещения грунта и механических свойств грунта. Последний параметр учитывается через коэффициент  $K_x$  в (1.4). Значение  $K_x$  определяется экспериментально по результатам соответствующих измерений. Согласно (1.4), коэффициент  $K_x$  имеет размерность МПа/м и физически означает жесткую связь между частицами грунта и внешней поверхностью газопровода при контакте с грунтом. Это жесткое соединение происходит в продольном и поперечном направлениях. Следует отметить, что существует строгая область применения закона или модели (1.4). Уравнение (1.4) справедливо до значения относительного смещения  $u = u^*$ , при котором частица грунта отделяется от внешней поверхности газопровода, связь между частицами грунта и внешней контактной поверхностью газопровода прекращается. Кроме того, другой закон заключается в необходимо описать процесс взаимодействия газопровода с грунтом. В ряде работ, процесс взаимодействия за пределами  $u^*$  описывается законом Кулона [138].

Фактически, из-за процессов сцепления между грунтом и внешней поверхностью газопровода, взаимодействие происходит между частицами почвы, «прилипшими» к газопроводу, и другими частицами породы. Поэтому при продольном взаимодействии газопровода с грунтом фактически происходит сдвиг и срез грунта вблизи внешней поверхности газопровода в определенном слое грунта.

Теоретическое обоснование существования контактного слоя грунта при сдвиговом взаимодействии твердого тела с грунтом, учитывает, что при незначительных напряжениях  $\sigma_N$ , нормальных к наружной поверхности тела, толщина контактного слоя составляла около 0,01 м. Процесс формирования силы взаимодействия  $\tau$  в заданном контактном слое пропорционален величине относительного смещения  $u$ , а затем после достижения равенство  $u = u^*$  распределяется в соответствии с законом Кулона. Таким образом процесс деформации сдвига контактного слоя грунта происходит отдельно. При сдвиговом взаимодействии твердого тела с грунтом контактный слой может быть разрушен, в то время как грунт за пределами контактного слоя остается неповрежденным. Это означает, что деформация в контактном слое не подчиняется законам упругости, и горная порода в целом может оставаться упругой или упруго-пластичной.

Растущие экономические и экологические требования к подземным газопроводам как средству транспортировки жидких и газовых веществ (иногда высокотоксичных) ставят перед исследователями проблему надежного и точного определения и прогнозирования напряжений, возникающих при смещениях грунта.

Экспериментальное определение сейсмических напряжений в подземных газопроводах является дорогостоящим и трудоемким. Поэтому теоретические методы определения напряжений при сейсмических воздействиях в подземных газопроводах являются наиболее подходящими.

В таких условиях принимается закон продольного взаимодействия газопровода с грунтом. По результатам экспериментов и наблюдений, схематические изменения зависимостей  $\tau(u)$  показаны на рисунке 1.3. [138].

Эксперименты по продольному взаимодействию газопроводов с грунтом и сдвиговому взаимодействию твердых тел с грунтом, показывают, что процесс взаимодействия газопровода с грунтом нарушенной и ненарушенной структуры существенно отличается.

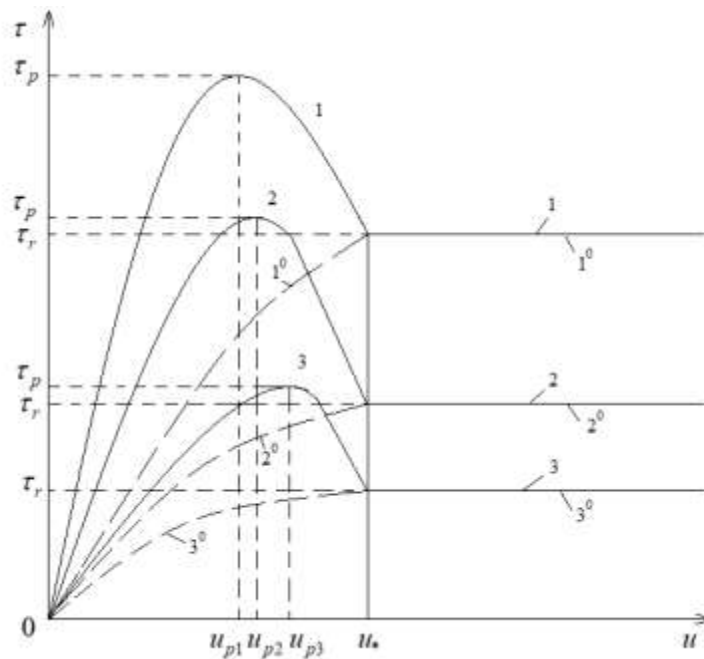


Рисунок 1.3 – Схематические зависимости напряжения сдвига  $\tau(u)$ , возникающего на поверхности контакта газопровода с грунтом, от относительного смещения  $u$  при различных нормальных напряжениях [138]

Структурно нарушенный грунт при строительстве газопроводных коммуникаций и сооружений со временем уплотняется и образует новую целостную структуру грунта вокруг газопровода. При взаимодействии газопровода с грунтом, процесс описывается сложными кривыми 1-3 (рисунок 1.3). Кривые 1-3 относятся к различным значениям напряжения  $\sigma N$  по нормали к внешней поверхности. Кривые 1-3 относятся к напряжениям  $\sigma N_1 < \sigma N_2 < \sigma N_3$ , соответственно. Как видно из рисунка 1.3, зависимости  $\tau(u)$  в диапазоне относительных перемещений  $0 \leq u \leq u^*$  для нарушенных (кривые 1-3) и ненарушенных структур почвы (кривые 1-3), различаются качественно и количественно. Как отмечалось выше, при взаимодействии газопровода с породой, был сформирован контактный слой почвы, подверженный структурному разрушению породы. При взаимодействии с почвой, при условии, что контактный слой был структурно не возмущён, зависимости  $\tau(u)$  показывают пиковое значение силы взаимодействия, в другом случае, контактный слой почвы был структурно нарушен, пиковое значение  $\tau_p$  не проявлялось (кривые 1-3). Согласно  $0 \leq u \leq u^*$  изменения  $\tau(u)$  в обоих случаях были криволинейными. Это связано с

микро-деструкцией структуры почвы в контактном слое в случае невозмущенной почвы и перегруппировкой частиц почвы в случае трещиноватого массива.

В случае уплотненного грунта с увеличением величины относительного смещения значение  $\tau$  возросло до  $\tau_p$ , достигнутое при  $u=u_p$ . На участке  $0 \leq u \leq u_p$  структура почвы подверглась микро-деструкции. После достижения  $\tau_p$  значение напряжения сдвига быстро снизилось до значения  $\tau_r$  при  $u = u^*$  и оставалось постоянным. В сечении  $u_p \leq u \leq u^*$  кривой  $\tau(u)$ , произошло интенсивное разрушение контактного слоя почвы. Следовательно, значения напряжения сдвига быстро снижались. После полного разрушения структуры почвы значение  $\tau$  оставалось постоянным и равным  $\tau = \tau_r$  [138].

Продольное взаимодействие подземного газопровода с грунтом происходило условно в двух направлениях, в прямом и обратном. На диаграмме  $\tau(u)$ , обратное движение газопровода относительно грунта может начаться с любой его точки, в зависимости от изменения сейсмической нагрузки. Обратное и повторное движение газопровода относительно грунта происходит в зависимости от степени разрушения контактного слоя. Это следует из результатов экспериментальных исследований взаимодействия подземных газопроводов с грунтом и исследований последствий сейсмозрывных колебаний на подземные коммуникации.

#### **1.4. Методы снижения сейсмического эффекта на охраняемые объекты от действия взрыв**

Влияние сейсмозрывной волны на охраняемые объекты - один из сопутствующих факторов применения буровзрывных технологий. После взрыва ударная волна и волны напряжений переходят в упругие (сейсмические) волны, которые равномерно распространяются во всех направлениях от источника возмущения. Возмущение, полученное пространством, длится ограниченный период времени, и величина результирующего возмущения уменьшается с увеличением эпицентрального расстояния от источника взрыва.

На протяжении многих лет проводились обширные исследования, связанные с СВВ. Эти исследования можно разделить на четыре основные направления:

1. Исследование влияния СВВ на близлежащие структуры и выявление критериев повреждений;
2. Прогнозирование СВВ в точке наблюдения;
3. Снижение уровня негативного воздействия СВВ в точке наблюдения;
4. Определение влияния различных параметров на уровень СВВ.

*1. Исследование влияния СВВ на близлежащие структуры и выявление критериев повреждений*

За последние несколько десятилетий были выявлены, определены и изучены с разной степенью успеха многие критерии повреждений. Первые исследования по критериям повреждений были проведены в 1927 году Роквелом, и известны как «Формула Энергии Роквела» [16, 32]. Николлс [116] обобщил предыдущие результаты и провел новые исследования по установлению связи между уровнем СВВ и величиной повреждений зданий. Исследовав реакцию конструкций и величину их повреждений в результате воздействия СВВ, Сискинд [102] построил график для оценки возможности безопасного проведения БВР, учитывающий пиковую скорость колебания частиц грунта (*PPV*) и частоту колебаний, известный как стандарт Бюро горной промышленности США (*USBM*). В этой публикации представлены также результаты предыдущих работ по определению критериев повреждений. В 1983 году Управление открытых разработок США (*OSM*) опубликовало свои нормативные акты по контролю колебаний грунта. Инструкция *OSM* отличается от правил *USBM* [32]. В 1986 опубликованы стандарты безопасности (*DIN*) для проведения взрывных работ [37]. Стандарты *USBM*, *OSM*, *DIN* применимы только в том случае, если известна пиковая скорость колебания грунта и частота колебаний в точке наблюдения.



## 2. Прогнозирование СВВ в точке наблюдения

Рядом исследователей проведена работа по предсказанию амплитуды СВВ. Эти исследования можно разделить на две группы: моделирование с нормативным расстоянием (НР) и имитационное моделирование, такое как метод конечных элементов (МКЭ) и модели искусственных нейронных сетей (ИНС).

НР моделирование: Большинство исследователей предположили, что пиковая скорость колебания частиц грунта в СВВ является функцией нормированного расстояния, то есть соотносит расстояния до взрывного к массе взрывчатого вещества на одну ступень замедления. Наиболее широкое применение получило уравнение, созданное USBM [16, 116]:

$$PPV = K(SD)^{-B} \quad (1.7)$$

$$SD = \frac{R}{Q^a} \quad (1.8)$$

где  $SD$  (Scaled Distance) – нормированное расстояние;  $PPV$  – пиковая скорость колебания частиц, мм/с;  $R$ – расстояние от места взрыва до точки измерения, м;  $Q$ – максимальная масса ВВ в ступени замедления, кг;  $K$ – добавочный коэффициент;  $B$  – добавочный фактор.

Многие исследователи [6, 63, 68, 84, 79, 114], основываясь на вышеуказанных зависимостях, также предложили модифицированные уравнения для прогнозирования пиковой скорости колебания частиц в точке наблюдения. Уравнения рассмотрены в [28] и приставлены в хронографическом порядке в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Уравнения расчета PPV [64]

Авторы	Вид уравнения
DuvallandFogelson (1962)	$PPV = \left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-B} \cdot K$
AmbraseyHendron (1968)	$PPV = \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-B} \cdot K$
Langefors and Khilstrom (1973)	$PPV = \left[\left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^B \cdot K$
IndianStandardPredicton (1973)	$PPV = \left(\frac{Q^{\frac{2}{3}}}{R}\right)^B \cdot K$

## Продолжение таблицы 1.2

Авторы	Вид уравнения
Daviesetal (1964), Attewell (1964), Daemen etal (1983)	$PPV = R^{-B} \cdot Q^{\alpha} \cdot K$
GhoshandDaemen (1983)	$PPV = K \cdot \left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}}\right)^{-B} \cdot x e^{-\alpha R}$ или $PPV = K \cdot \left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{2}}}\right)^{-B} \cdot x e^{-\alpha R}$
CMSR (Guptaetal 1987)	$PPV = K \cdot \left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{2}}}\right)^{-B} \cdot x e^{-\alpha\left(\frac{R}{Q}\right)}$
CMSR (Roy 1991)	$PPV = n + K \cdot \left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}}\right)^{-1}$

где  $n$ , добавочный коэффициент, а  $\alpha$  – добавочный фактор.

На сегодняшний день методы количественной оценки сейсмического действия взрыва базируются на теории подобия. Где в основе лежит зависимость скорости колебаний грунта, зависящая от приведенного расстояния между источником возникновения СВВ к пункту наблюдения и массы заряда (ВВ) [58, 59, 60, 61]:

$$V = K_c \cdot \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-n} \quad (1.9)$$

где  $V$  – допустимая скорость смещения горных пород в основании охраняемого сооружения, см/с;  $Q$  – масса одновременно взрываемого заряда ВВ, кг;  $R$  – расстояние от охраняемого объекта до ближайшей скважины взрываемого блока, м;  $n$  – коэффициент затухания сейсмозрывных волн;  $K_c$  – коэффициент сейсмичности, учитывающий множество факторов, связанных с критериями ведения БВР.

Приведенные выше уравнения в основном базируются на статистических зависимостях. Для определения добавочных коэффициентов с помощью множественного регрессионного анализа, должны быть проведены полевые испытания. Опубликовано множество исследований, проведенных с целью определения конкретных коэффициентов [12, 75, 83, 85, 125] для управления СВВ.

ИНС моделирование: ряд исследователей пытались предсказать колебания грунта с помощью искусственной нейронной сети, которая включает в себя большое число параметров [79, 118]. Для предсказания PPV и частоты колебания этот метод учитывает диаметр скважины, количество скважин, длину скважины, забойку, заряд в ступени замедления, горизонтальные и радиальные расстояния. Авторы утверждают, что модели ИНС обеспечивают лучшее предсказание PPV, по сравнению с другими методами [16, 17].

Метод конечных элементов (МКЭ): Торано и соавторы [94, 127, 122] разработали модель МКЭ для прогнозирования PPV. В своей модели они пытались имитировать факторы, которые оказывают влияние на вибрацию. Таким образом, были созданы искусственные колебания для анализа реальных сложных волн.

### *3. Снижение уровня негативного воздействия СВВ точки наблюдения*

Были проведены исследования, чтобы устранить или уменьшить негативное влияние СВВ в точке наблюдения. Целью одного направления исследования было уменьшение СВВ в месте возникновения путем изменения количества ВВ, типа ВВ, геометрии взрывных скважин и т.д., в то время, как другое направление было посвящено снижению уровня колебаний в точке наблюдения путем создания искусственно сосредоточенных неоднородностей между очагом взрыва и точкой наблюдения – таких как рассечение грунта, барьер из скважин, траншеи. В первой группе для определения добавочных коэффициентов использовалось в основном моделирование нормированного расстояния. После определения добавочных коэффициентов для конкретной области подсчитывалось количество ВВ в ступени замедления, удовлетворяющее условиям безопасного ведения БВР [75, 83, 101, 125].

Исследования с применением при БВР искусственных рассечений, барьеров из скважин, траншей [6, 23, 73, 85, 89, 124] между очагом взрыва и точкой наблюдения показали, что эти искусственные пустоты ведут себя как барьер перед взрывной волной и уменьшают уровень СВВ.

#### 4. Определение влияния различных параметров на уровень СВВ

Интенсивность амплитудных значений колебаний зависит от множества параметров. Которые принято разделять на две категории: контролируемые и неконтролируемые параметры [101].

К контролируемым параметрам в основном связаны с проектированием БВР и взрывными характеристиками ВВ. К неконтролируемым параметрам относятся свойства геологических структур и характеристики породы, которые учитываются в дополнительных коэффициентах, и их влияние на PPV определено посредством регрессивного анализа.

Результаты изучения группы параметров, влияющих на PPV [73, 88, 116, 126], проведенного различными исследователями, обобщены и представлены в таблице 1.3 [80]. Как видно из таблицы, уровни колебания грунта вблизи очага взрыва и в точке наблюдения различаются. PPV вблизи очага влияет на PPV в точке наблюдения.

Таблица 1.3 – Параметры, влияющие на PPV [80]

Параметры, влияющие на PPV вблизи очага взрыва		
Неконтролируемые параметры	Контролируемые параметры	
	Зависящие от заряжения:	Зависящие от проекта:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Геологическая структура</li> <li>• Характеристики породы</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Тип ВВ</li> <li>• Количество ВВ в ступени замедления</li> <li>• Количество скважин в ступени замедления</li> <li>• Интервал замедления</li> <li>• Декаплинг</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Диаметр скважины</li> <li>• ЛНС</li> <li>• Расстояние между скважинами</li> <li>• Длина заряда</li> <li>• Забойка</li> <li>• Перебур</li> <li>• Длина скважины</li> </ul>
Параметры, влияющие на PPV в точке наблюдения		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• PPV вблизи очага взрыва</li> <li>• Расстояние от очага взрыва до точки наблюдения</li> <li>• Геологические структуры между очагом и точкой наблюдения</li> <li>• Характеристики породы</li> </ul>		

Параметры, представленные в таблице 1.3, зависят друг от друга (связаны между собой). Если один параметр меняется, другие параметры тоже будут изменены. Их соотношение и влияние друг на друга должны быть определены для возможности уменьшения негативных воздействий СВВ и ее величины в целом.

Эти исследования показали взаимосвязь между параметрами БВР, влияющими на СВВ. Основные тенденции отношений между параметрами колебаний грунта представлены в виде диаграммы отношений [80]. Из диаграммы следует, что основное влияние на колебания грунта вблизи очага взрыва оказывают количество одновременного взрываемого ВВ, ЛНС, и забойка. Основное влияние на интенсивность  $PVV$  в точке наблюдения оказывают  $PVV$  вблизи очага и геологические структуры, расположенные между очагом и точкой наблюдения.

Чтобы получить более ясное представление о тенденциях и взаимосвязях параметров, проведён анализ с целью количественно оценить взаимосвязи между параметрами. Концепция этого анализа основана на количестве отношений одного параметра к другому. Из этого анализа можно получить оценку процентного значения каждого действующего фактора. В таблице 1.4 приведены доли каждого параметра, который носит свой вклад в образование СВВ. Для определения лучших стратегий по снижению уровня СВВ принято решение сосредоточить внимание на тех влияющих факторах, вклад которых превышает 10%.

Взаимосвязи параметров, которые влияют на  $PVV$  в точке наблюдения, приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.4 – Доля вклада каждого параметра в ПСКЧ (пиковая скорость колебания частиц) вблизи очага по данным диаграммы отношений параметров БВР [80]

Влияние	Масса ВВ в ступени	ЛНС	Кол-во скважин в ступени	Забойка	Перебур	Расстояние между скважинами	Число свободных поверхностей	Интервал замедления	Тип ВВ
На	3	1	1	1	1	1	0	0	0
От	2	5	1	1	1	1	1	1	1
Всего	5	6	2	2	2	2	2	2	2
%	21,7	26,2	8,7	13,1	8,7	8,7	4,3	4,3	4,3

Таблица 1.5 – Доля вклада каждого параметра в ПСКЧ в точке наблюдения по данным диаграммы отношений параметров БВР [80]

Влияние	PPV вблизи очага	Геологические структуры	Характеристики породы	Расстояние от очага до точки наблюдения
На	9	1	0	0
От	1	1	1	1
Всего	10	2	1	1
%	71,5	14,3	7,1	7,1

Не следует забывать, что такие параметры, как характеристика породы и расстояние между двумя точками нельзя изменить. Геологические структуры также не могут быть изменены, но искусственные пустоты, созданные на пути продвижения СВВ, могут снизить уровень ее воздействия. В этом случае лучший способ снижения уровня воздействия СВВ в точке наблюдения – либо уменьшение *PPV* вблизи очага, либо создание искусственных пустот между очагом и точкой наблюдения.

### **1.5. Исследования и оценка сейсмического воздействия на охраняемые объекты**

При выборе оптимальных, с точки зрения сейсмической безопасности, параметров ведения БВР, в Российской Федерации и мире принято опираться на значение предельно допустимой (критической) скорости смещения грунта в основании охраняемого объекта. Выбираемые значения в свою очередь опираются на существующие нормативные документы [72], также фактическое состояние охраняемых объектов, сроках их эксплуатации, степени ответственности, материалов изготовления и т.д.

Так в одном из отчетов «Бюро горной промышленности» США [32] на основании 10-летних исследований приведено следующее: повреждения жилых сооружений от взрывных работ более тесно коррелируют с результирующей скоростью смещения грунта, нежели с ускорением или смещением.

Основным критерием сейсмической безопасности охраняемого объекта в нормативных документах Российской Федерации принимают максимально допустимую скорость смещения грунта. В США таким критерием является

допустимая векторная и суммарная энергия. Однако количественные параметры и у нас в стране и в США лежат в одном и том же диапазоне значений: для особо охраняемых инженерных конструкций 1 до 12 см/с (в США допустимой скоростью, при которой обеспечивается безопасный уровень сейсмической энергии, считается 3-12 см/с) [4, 7, 63,64]. Скорость и энергия оцениваются как формулы (1.10 и 1.11):

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.10)$$

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2} \quad (1.11)$$

где  $v$  – векторная скорость и  $W$  – векторная энергия;  $x, y, z$  – соответственно радиальная, тангенциальная и вертикальная составляющая.

Распространение сейсмической волны характеризуется скоростью перемещения единичной массы грунта или другой среды (в см/с) и периодом колебаний  $T$  (в с). Зная два эти параметра, численно определяются ускорение смещения,  $j$  (в см/с<sup>2</sup>) и амплитуда смещения  $S$  (в см), а также энергия сейсмических колебаний  $W_s$ , (в кДж).

«При выборе допустимых скоростей в сплошных средах большое значение имеет общая оценка деформационных свойств горных пород. В таких средах сжатие, и разгрузка горных пород происходят упруго, т.е. по одному закону без остаточной деформации, при  $\sigma \gg \sigma_s$ - сжатие и разгрузка протекают по разным законам с остаточной деформацией. Следовательно, при  $\sigma_1 > \sigma_s$  в среде могут образовываться остаточные деформации, размер которых зависит от максимального напряжения в волновом фронте, которому среда подвергается при прохождении сейсмической волны» [10].

Связь зависимости скорости колебаний грунта от упругопластических свойств горных пород и их относительной деформации [5] описывается формулой (1.12) [11]:

$$v_0 = \frac{0.375 \left( c_p^2 - \frac{4}{3} c_s^2 \right) \left( (1 + (1 - 2\mu)\varepsilon_0)^{\frac{3}{8}} - 1 \right)}{c_p (1 + (1 - 2\mu)\varepsilon_0)^4} \quad (1.12)$$

где  $V_0$  – скорость колебаний горной породы, см/с;  $\varepsilon_0$  – относительная деформация.  $C_s$  и  $C_p$  – скорость продольной и поперечной волны, м/с;  $\mu$  – коэффициент Пуассона породы.

Допустимые деформации в основании охраняемого объекта определяются классификацией конструкции, сроком службы и важностью объекта [1].

Критическую скорость колебаний можно определить как две допустимые скорости  $V_0$ .

Количественные параметры сейсмического действия взрыва, при определенных горно-геологических условиях, определяются из условия, что допустимая скорость колебаний и скорость колебаний, возникающая в среде при взрыве заряда массой  $Q$  на расстоянии  $R$  от конструкции [6] равны и скорость колебаний, может быть определена по формуле (1.13) [33].

$$v = 10^4 \cdot 7,5 \cdot \sqrt{\frac{q}{c_p \rho \tau}} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^n \quad (1.13)$$

Допустимые скорости смещения определены для большинства конструкций и типов горных пород [6].

В случае газопроводов, к сожалению, скорости смещения могут быть только приблизительно определены расчетными методами.

Определенная таким образом допустимая скорость смещения у основания газопровода, не дает точных значений возникающей сейсмозрывной волны, это связано с различными факторами, накладывающими свой отпечаток на характер распространение сейсмических колебаний. В связи с этим возникает необходимость в постоянном отслеживании параметров сейсмозрывной волны (скорости, ускорения и смещения) в горной породе, с помощью инструментальных методов. Сейсмический мониторинг вблизи особо охраняемого объекта проводится уже после определения параметров среды (коэффициента сейсмичности и коэффициента затухания). Необходимость такого рода мониторинга обусловлена возможным нарушением технологии ведения взрывных работ [64, 51, 126]:

– нарушение схемы монтажа взрывной сети;



- завышение массы заряда на ступень замедления;
- занижение установленных интервалов между ступенями замедления.

Конечно, при проведении подобного мониторинга подземных газопроводов есть особенности, которые необходимо учитывать при разработке методики измерений. Нижеизложенные исследования посвящены выявлению и учету этих характеристик.

Общепринятыми критериями оценки интенсивности сейсмических колебаний являются, как упоминалось выше, скорость частиц и энергия колебаний  $W_s$ ,

$$W_s \sim \int_0^t v^2 dt \quad (1.14)$$

Чтобы выразить параметры сейсмической волны как функцию (1.15) массы заряда взрывчатого вещества  $Q$  и расстояния до места взрыва  $R$ , обычно принято интерпретировать их в терминах геометрического подобия энергетических параметров [11]:

$$\bar{Q} = \frac{\sqrt[3]{Q}}{R}; \bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \quad (1.15)$$

«Скорость, смещение, и период сейсмических колебаний могут быть выражены соответственно, как (1.16-1.18) [11]:

$$v = k_2 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{n_2} \quad (1.16)$$

$$S = \frac{k_1 \cdot t}{2 \cdot n \sqrt[3]{f(n)}} \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{n_1} \quad (1.17)$$

$$t = k_3 \lg R \quad (1.18)$$

где  $f(n)$  – функция показателя действия взрыва;  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты горно-геологических условий;  $n_1$  и  $n_2$  – показатели степени затухания сейсмических колебаний» [10].

Анализ волновой картины действия взрыва в горных породах [18, 46, 95] показывает, «что если в области действия ударных волн затухание напряжений и соответственно скорость смещения пропорциональны  $R^{-3}$  (в некоторых случаях, в средах высокой сжимаемости,  $R^{-4}$ ), в области упругопластических волн  $\sim R^{-2}$  (в

некоторых случаях  $R^{-3}$ ), то в области сейсмических волн затухание скорости смещения пропорционально  $R^{-1}$  и только в зоне ближнего действия взрыва, где наблюдается нелинейно упругое поведение пород ( $\sim R^{-1.5}$ ), и в зоне распространения поверхностных волн ( $\sim R^{-0.5}$ )» [65], около 1% потенциальной энергии взрывчатого вещества переходит в сейсмическую волну, что упрощает сейсмическую защиту инженерных сооружений от действия взрыва.

Допустимая относительная деформация грунтов в основании ограниченного объекта выбирается в соответствии с классом охраняемого объекта, определяемым по их ответственности и сроку эксплуатации [53].

Критическая скорость сейсмических колебаний определяется как удвоенное значение допустимой скорости смещения.

Таблица 1.6 – Рекомендуемые допустимые скорости колебаний сооружений разных классов для горных пород [10]

Характеристика горных пород	Крепость пород	$C_p$ км/с	Допустимая скорость колебаний для сооружений, см/с			
			I класс	II класс	III класс	IV класс
Рыхлообломочные отложения и наносы	0,5 - 1	1 – 2	4,08	8,2	12,2	20,4
Сильнотрещиноватые породы с глиной и высокой пористостью	1 – 3	2 – 3	6,8	13,6	20,3	34,0
Скальные породы со значительной естественной трещиноватостью	3 – 5	3 – 4	9,5	19,0	28,4	47,5
Относительно монолитные породы с отдельными трещинами и пустотами	5 – 9	4 – 5	12,2	24,4	36,7	60,0
Монолитные породы слабо-трещиноватые	9 – 14	5 – 6	14,9	29,8	44,6	74,5
Очень крепкие и монолитные породы практически без трещин	14 - 20	6 – 7	17,8	35,6	53,3	89,0

Скорость сейсмических колебаний в конкретных горно- геологических условиях рекомендуется определить экспериментально, путем специальных сейсмических исследований [63].

## 1.6. Выводы по главе 1

Приведенные выше положения указывают на то, что прочностные характеристики охраняемого объекта и параметры СВВ, создаваемые взрывом, несут ответственность за сохранность зданий и сооружений, расположенных в непосредственной близости от места проведения взрывных работ.

Как указано за характеристики СВВ отвечает практически все параметры БВР, однако расчетные зависимости, которые направлены на прогнозирование параметров СВВ вблизи защищаемого объекта, в основном учитывают только интервал замедления и массу заряда, взорванного на фиксированном расстоянии от места взрыва.

Как было продемонстрировано, одной из важных характеристик СВВ, влияющих на безопасность защищаемых конструкций (зданий или сооружений), является ее частота, поскольку, когда частота колебаний, влияющих на конструкцию, совпадает с ее собственной частотой, могут возникать резонансные явления. В свою очередь, когда такие явления происходят в узлах охраняемого объекта, или для всей конструкции в целом, как для единой колебательной системы, увеличивается вероятность нарушения целостности конструкции или её полное разрушения. Одним из таких колебательных воздействий на охраняемые объекты является воздействие, оказываемое СВВ на рассматриваемый объект, при проведении непосредственной близости от него взрывных работ. Однако, рекомендации по определению частоты колебаний грунта в СВВ при производстве БВР вблизи охраняемых объектов, не существует. Ограничение по частотам колебаний в зависимости от скорости этих колебаний существуют только для наземных сооружений. Так в одном из нормативных документов USBM (*United States Bureau of Mines – Американского Бюро Горного Дела*) представлен график, определяющий допустимую взаимосвязь между скоростью и частотой колебаний грунта, для обеспечения сохранности конструкций, в частности, малоэтажных жилых зданий. В этом же документе описываются преобладающие частоты, соответствующие взрывам, проводимым в карьерах, в шахтах, при строительстве. В последнее время в российской нормативно-

правовой базе появились документы, регулирующие сейсмические воздействия взрыва с учетом частотных характеристик. Часто эти документы используют опыт зарубежных коллег, в том числе публикации USBM. Для подземных сооружений допустимые диапазоны частот вибрационных воздействий не регламентируются, поэтому изучение этого вопроса требует особого внимания.

Особенно это касается подземных газопроводов. Поскольку измерение на уровне закладки газопровода, чрезвычайно трудоемкий процесс, и ввиду этого обычно измерения производятся на поверхности.

## **ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН**

### **2.1. Предпосылки к проведению исследований по определению влияния параметров БВР на изменение частоты колебаний СВВ**

Сейсмозрывная волна, проходящая через горные породы, представляют собой совокупность волн различного характера, каждая составляющая имеет свою собственную частоту колебаний и скорость распространения. Общемировая практика показывает, что в настоящее время мониторинг характеристик сейсмозрывных волн заключается в определении результирующей скорости смещения по всем составляющим СВВ продольных и поперечных колебаний. В редких случаях прибегают к определению производной от скорости - ускорению. Однако, как уже было изложено в предыдущей главе, для обеспечения полной сейсмической безопасности охраняемого объекта, данных о скорости смещения может быть недостаточно. Возникновение резонансных явлений, когда собственная частота колебаний охраняемого объекта совпадает с частотой приходящей волны, чаще возникают у зданий и сооружений, расположенных на поверхности, однако пренебрегать вероятностью совпадения частот колебаний действующего газопровода и сейсмозрывной волны с точки зрения безопасности не целесообразно. Именно поэтому определение и наблюдение за частотными характеристиками сейсмозрывной волны, могут помочь спрогнозировать воздействие СВВ на охраняемые объекты и повысить их безопасность.

### **2.2. Методика проведения исследования**

Исследования основываются на данных сейсмониторинга при ведении БВР, полученных прямыми измерениями с помощью сейсмостанций в ходе работ по расширению пропускной способности газопровода, путем создания дополнительной ветки североευропейского газопровода «Северный поток 1», который проходит параллельно существующему газопроводу «Ленинград-Выборг-Госграница-1,2». На некоторых участках расстояния между прокладываемой траншеей и газопроводом составляло менее 25 метров.

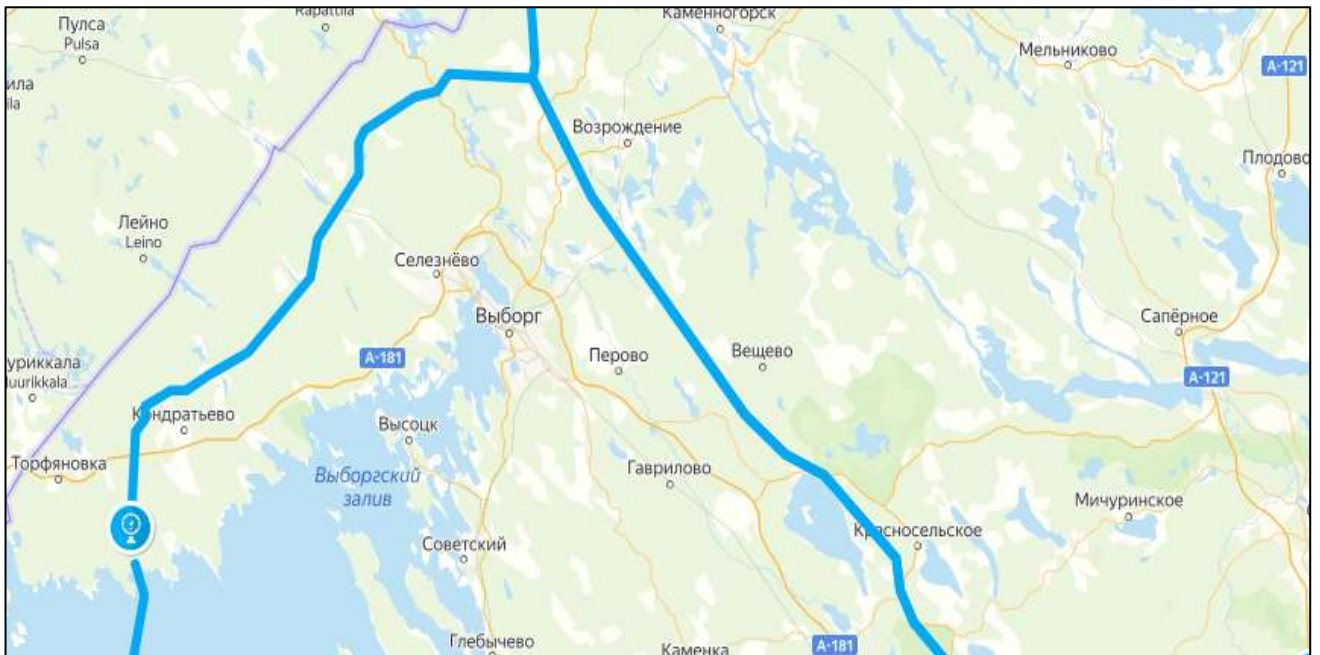


Рисунок 2.1 – Схема расположения действующих и проектируемых линий газопровода [84]

Для анализа частотных характеристик были использованы данные 20 массовых взрывов, полученных в ходе мониторинга СВВ при проходке траншеи в скальных грунтах, сложенных в основном гранитами и гранитогнейсами с коэффициентом крепости породы  $f=16$ , и I-III категорией трещиноватости.

Для отобранных двадцати массовых взрывов (таблица 2.1) диаметр скважин был равен 76 мм, глубина скважины, варьировалась от трех до пяти метров. Интервал замедления между скважинами в ряду составлял 42 мс, а между рядами – 64 мс. В каждой ступени одновременно взрывалось по 3 заряда. Схема расположения скважин оставалась неизменной и составляла согласно паспортам сетку 1,8 на 1,5 метра. Расстояние от установленной сейсмической станции до взрываемого блока составляло от 18 до 28 метров.

Изменение расстояния от взрываемого блока до датчиков обусловлено методикой проведения эксперимента, датчики устанавливались вдоль оси действующего газопровода, со смещением в сторону взрыва на расстояние не менее 5 метров.

Таблица 2.1 – Параметры БВР

№	Наименование показателя	ед. изм.	Значение
1	Диаметр скважины	мм	76
2	Глубина скважин	м	3-5
3	Количество взрывных скважин	шт.	165
4	Сетка скважин	м	1,8x1,5
5	Кол-во ВВ на скважину	кг	1,75-3,25
6	Тип ВВ		Нитронит П-60, ПАС-60
7	Способ инициирования		НСИ
8	Интервалы замедления	мс	42
9	Метод уменьшения разлета кусков горной породы		Взрывание с применением укрытия (песок)
10	Расстояние до места взрыва	м	25
11	Максимальное кол-во ВВ в ступени замедления	кг	9,75

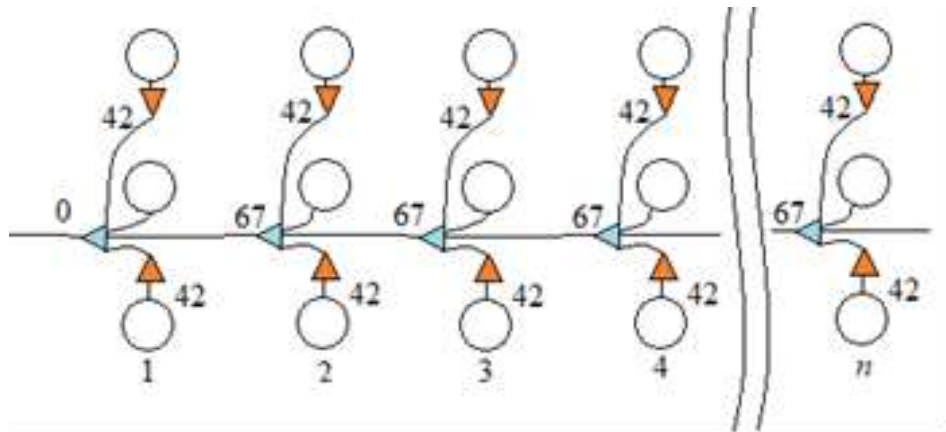


Рисунок 2.2 – Схема монтажа взрывной сети на участке строительства СЕГ

При проведении взрывных работ применялось патронированное взрывчатое вещество Нитронит П-60, ПАС-60. Подрыв зарядов осуществлялся неэлектрической системой инициирования ИСКРА-П.

Полученные в ходе мониторинга данные были сведены в таблицу (2.2) и представлены ниже. В ней отражены основные параметры БВР, также получаемые данные о скорости, ускорении и смещения, и полученные методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) данные о частоте и амплитуде полученных сигналов сейсмограмм.

Для проведения мониторинга применялись портативные сейсмостанции Blastmate III и Minimate Plus фирмы InstanTel, оснащённые трёхкомпонентными датчиками (рисунки 2.3 и 3)



Рисунок 2.3 – Сейсмостанция Blastmate III



Рисунок 2.4 – Сейсмостанция MinimatePlus

Кроме описанных выше сейсмостанций InstanTel, применялся четырехканальный цифровой осциллограф фирмы Tektronixс однокомпонентными высокочастотными сейсмоприемниками СВ-5. Данные с этих датчиков представлены в нижеизложенных главах.

Для анализа получаемых сейсмограмм применялся программный комплекс THOR компании InstanTel, позволяющий накладывать различные



Таблица 2.2 – Данные, полученные при проведении мониторинга

№	данные по взрывам		параметры БВР		Кол.во СКЕм	расстояние	кол ВВ.	расстояние	прив.расст	прив.расст	скорость	мм/с			сумм	частота			Hz
	дата	время	укрытие	вв								до датчика	$\wedge 1/3$	$\wedge 1/2$		x (Tran)	y (Vert)	z (Long)	
1	12.10.18	12:21	песок	нитронит П-60	48	24	7,5	25	12,77	9,13	15,748	19,05	10,541	<del>26,87</del>	32,00	33,00	36,60		
2	13.10.18	12:22	песок	нитронит П-60	45	22,5	7,5	28	14,30	10,22	11,557	9,652	27,432	<del>31,29</del>	36,50	40,00	20,50		
3	05.11.18	12:18	песок	нитронит П-60	165	82,5	9,75	25	11,70	8,01	30,23	25,15	39,24	<del>55,55</del>	22,50	22,90	18,00		
4	08.11.18	15:05	песок	нитронит П-60	147	73,5	23,25	20	7,01	4,15	83,06	60,07	88,39	<del>135,35</del>	2,60	2,00	9,00		
5	10.11.2018	11:57	песок	нитронит П-60	119	59,5	12	23	10,05	6,64	56,134	52,197	45,593	<del>89,19</del>	15	2	2		
6	14.11.2018	13:34	песок	нитронит П-60	90	45	9,75	18	8,43	5,76	32,385	48,51	70,99	<del>91,88</del>	24,87	12,00	27,6		
7	18.11.2018	14:49	песок	нитронит П-60	139	69,5	8,3	24	11,85	8,33	27,432	50,80	38,35	<del>69,31</del>	29,66	23,00	24,9		
8	21.11.2018	16:31	песок	нитронит П-60	86	43	7,5	19	9,71	6,94	30,48	28,829	35,306	<del>54,83</del>	40	46,00	55		
9	22.11.2018	12:44	песок	нитронит П-60	65	32,5	9,75	23	10,77	7,37	15,748	20,574	18,288	<del>31,71</del>	20	32	64,6		
10	07.12.2018	15:38	песок	нитронит П-60	235	117,5	13,25	23	9,72	6,32	72,644	92,583	66,929	<del>135,38</del>	12	17	27,8		
11	09.12.2018	15:57	песок	нитронит П-60	307	153,5	15,5	29	11,63	7,37	29,21	66,04	46,355	<del>85,81</del>	15	12	9		
12	10.12.2018	16:34	песок	нитронит П-60	45	22,5	5	26	15,20	11,63	16,637	23,749	33,528	<del>44,33</del>	52,8	68	56		
13	14.12.2018	12:45	песок	нитронит П-60	221	110,5	12	23	10,05	6,64	31,115	39,37	58,293	<del>76,92</del>	2,1	10	14		
14	19.12.2018	16:14	песок	нитронит П-60	120	60	13,5	30	12,60	8,16	5,461	9,779	6,858	<del>13,13</del>	10,4	6	10		
15	19.12.2018	16:44	песок	нитронит П-60	82	41	5	28	16,37	12,52	8,255	13,208	10,287	<del>18,67</del>	33,5	45	59		
16	22.12.2018	12:08	песок	нитронит П-60	106	53	11,25	15	6,69	4,47	83,058	73,025	58,42	<del>125,08</del>	2	8	8		
17	22.12.1018	14:14	песок	нитронит П-60	119	59,5	12	26	11,36	7,51	13,081	23,495	16,002	<del>31,29</del>	30,4	35	46		
18	23.12.2018	14:27	песок	нитронит П-60	198	99	12	22	9,61	6,35	9,398	44,831	11,176	<del>47,15</del>	22	20	29		
19	26.12.2018	12:25	песок	нитронит П-60	83	41,5	12	25	10,92	7,22	19,812	27,305	19,05	<del>38,74</del>	18	12	17		
20	05.01.2019	12:38	песок	нитронит П-60	179	89,5	18,17	24	9,13	5,63	19,05	27,686	40,386	<del>52,54</del>	6	4	7		
blastMATE																			
№	данные по взрывам		параметры БВР		Кол.во СКЕм	расстояние	кол ВВ.	расстояние			скорость	мм/с			сумм	частота			Hz
	дата	время	укрытие	вв								до датчика	x (Tran)	y (Vert)		z (Long)	x (Tran)	y (Vert)	
1	12.10.18	12:21	песок	нитронит П-60	41	20,5	5,25	23	13,2335004		17,53	17,02	24,77	34,79	2,00	212,00	121,80		
2	13.10.18	12:22	песок	нитронит П-60	48	24	7,5	25	12,77182387		22,61	22,35	24,51	40,14	37,00	42,00	21,60		
3	14.10.18	12:17	песок	нитронит П-60	45	22,5	7,5	28	14,30444274		11,94	10,92	36,07	39,53	23,20	54,20	23,50		
4	16.10.18	15:26	песок	нитронит П-60	32	16	6,3	27	14,61897469		4,95	14,86	2,29	15,83	63,90	57,00	2,00		
5	18.10.18	15:42	песок	нитронит П-60	101	50,5	9,75	27	12,63850076		30,61	21,46	36,20	52,03	68,90	91,20	53,60		

фильтры, а также изменять масштабности сейсмограмм и способный моментально производить быстрый анализ Фурье (рисунки 2.5 и 2.6).

Tran Peak Particle Velocity 2.286 mm/s at 0.408 sec  
Vert Peak Particle Velocity 4.318 mm/s at 0.562 sec  
Long Peak Particle Velocity 5.715 mm/s at 0.318 sec

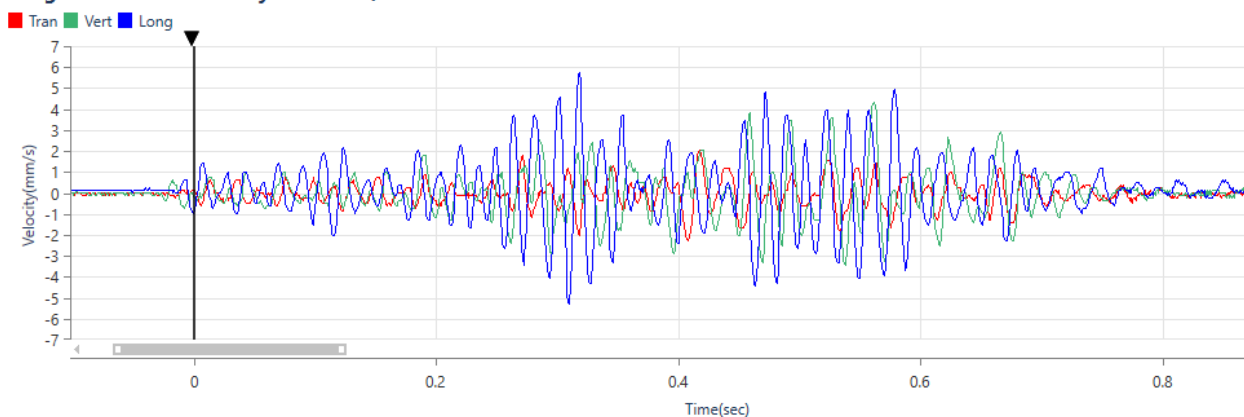


Рисунок 2.5 – Пример регистрируемой сейсмограммы

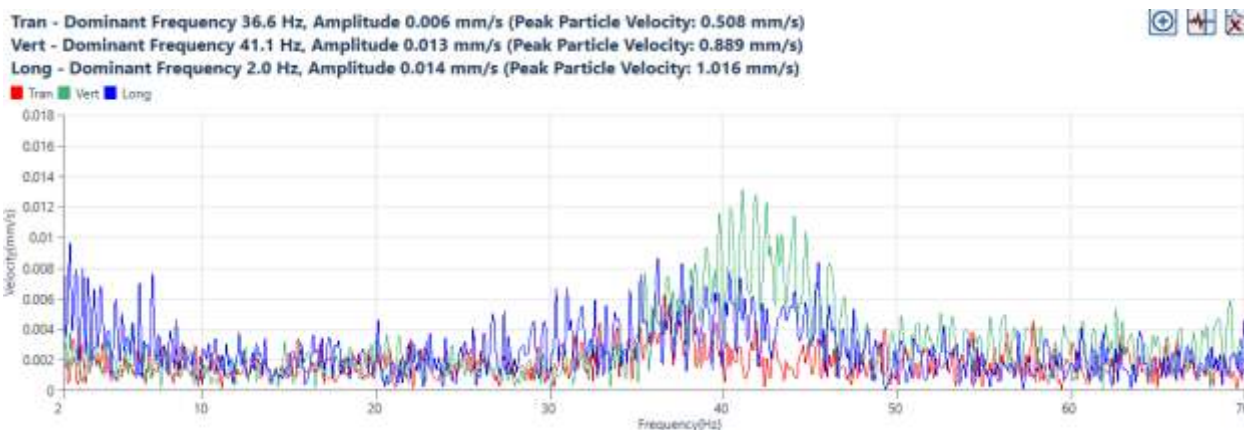


Рисунок 2.6 – Спектр частотных характеристик, полученный при использовании быстрого преобразования Фурье

### 2.3. Исследование зависимости сейсмических колебаний грунта от параметров проведения БВР

Анализ данных, полученных в ходе мониторинга, проводился с целью получения зависимостей характеристик сейсмозрывной волны в горных породах от параметров буровзрывных работ, а также для нахождения связей между отдельными параметрами сейсмозрывной волны.

Рассмотрим механику распространения упругих волн в массиве скальных пород при производстве БВР, как в отдельно взятой ограниченной системе. Взрыв генерирует колебания широкого спектра частот [61, 63, 117],

а далее, порода, через которую распространяется СВВ, выступает в качестве фильтра, «отфильтровывая» часть спектра сигнала, и пропускает лишь колебания, характерные для данных условий [61, 117]. Получаем, что при рассмотрении зависимостей распространения СВВ в упругой среде (грунте) первичной характеристикой является собственная частота колебаний массива в сейсмозрывной волне.

На рисунке 2.7 представлена зависимость амплитудных значений трех составляющих скорости смещения грунта СВВ от частоты колебаний СВВ, полученных в ходе БПФ. Максимальные значения амплитуды располагаются в диапазоне низких частот от трех до пятнадцати Гц. Этот результат подтверждает, исследования предшественников [18, 55, 56, 113] о низкочастотных колебаниях массива от действия взрыва. Максимум амплитуды для данного взрыва находится на частоте 25 Гц, и далее с увеличением частоты колебаний амплитудные значения этих колебаний падают.

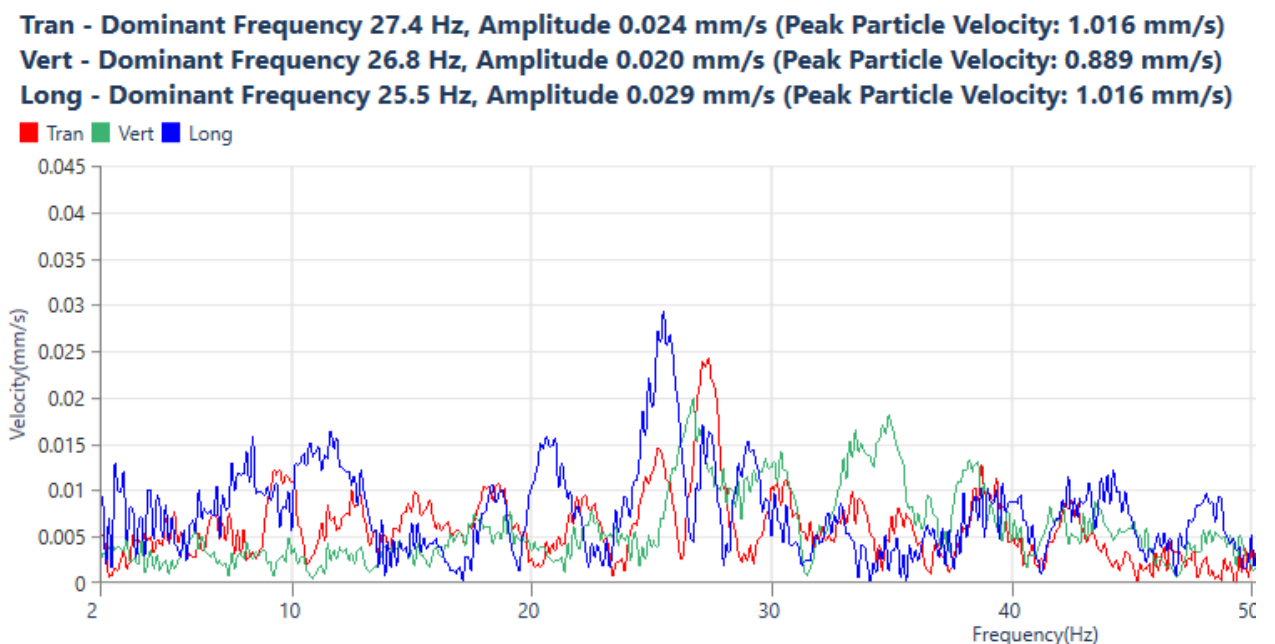


Рисунок 2.7 – Спектр амплитуды скорости смещения от частоты

По набору данных полученных, в ходе БВР проведён, анализ значений частоты, соответствующих максимальной частоте колебаний таблица 2.2, который показал рисунок 2.10, что в наших экспериментах наиболее часто

максимум амплитуды колебаний (по всем составляющим) наблюдался на частоте 20 Гц (~ 10%). Минимальная частота, зарегистрированная при мониторинге БВР, составила 2 Гц, максимальная – 78 Гц.

Проведя оценку быстрым преобразованием Фурье каждого из отобранных взрывов, мы получили распределение частот и максимумов амплитуды. На рисунке 2.10 представлена диаграмма распределения частотных характеристик и количество совпадений частот. Опираясь на неизменные в ходе проведения БВР параметры, такие как: тип ВВ, способ инициирования, параметры сетки скважин и диаметры зарядов. Было решено изучить зависимость частотных характеристик от протяженности взрываемого блока и массы одновременно взрываемого заряда.

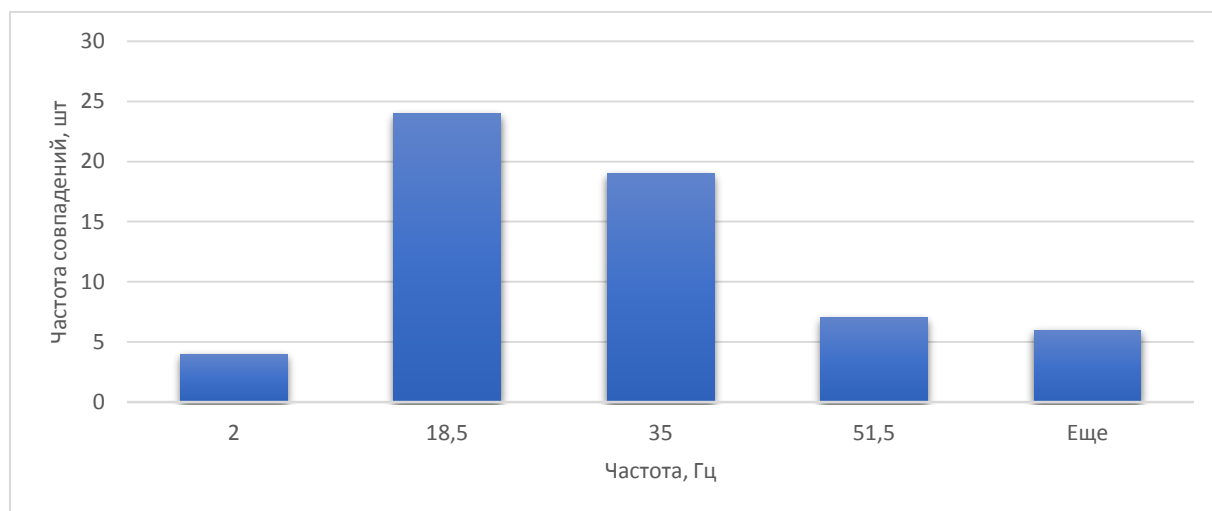


Рисунок 2.8 – Диаграмма распределения количества спектральных максимумов по частотам

На диаграмме (рисунок 2.8) представлено распределение максимумов амплитуды в соответствии с частотой, которой они соответствуют. Накопительная диаграмма построена с использованием столбцов 18-20 таблицы 2.2 и показывает, что наиболее часто максимум амплитуды наблюдался на частоте около 18 Гц.

Согласно вышеизложенному, частота колебаний грунта является одним из важных параметров при определении воздействия сейсмозрывных волн на здания и сооружения [3, 15, 119]. Как описано в первой главе в случае, когда частота колебаний грунта совпадает с собственной (резонансной)

частотой охраняемого объекта, находящегося в непосредственной близости от места ведения ВР, вероятность нарушения целостности или полного разрушения сооружения существенно увеличивается [115, 116].

По полученным БПФ данным от рассматриваемых взрывов была построена зависимость частоты колебаний от протяженности взрываемого блока. (рисунок 2.9).

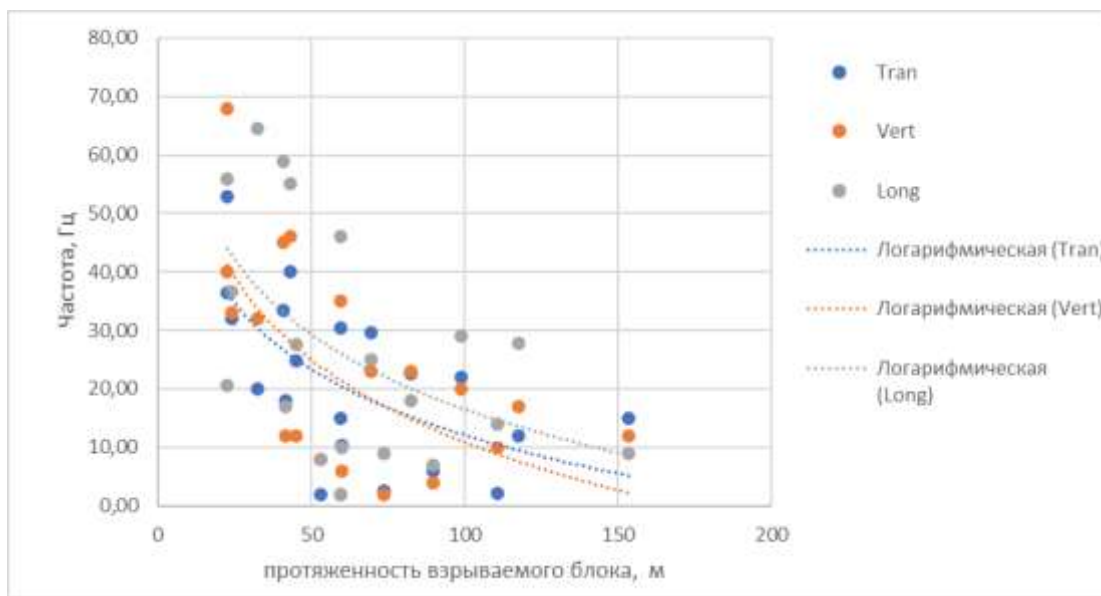


Рисунок 2.9 – Зависимость частоты, на которой зарегистрирован максимум амплитуды, от общей протяженности взрываемого блока

Видно, что линии логарифмической аппроксимации значений частот для горизонтальных и вертикальных составляющих изменяются по одному и тому же закону распределения, но с разной интенсивностью, однако это приближение не дает точной сходимости результатов частотной зависимости от длины блока.

Далее рассмотрим зависимость частоты от массы ВВ на ступень замедления рисунок 2.10.

Используя логарифмическую аппроксимацию данных по частоте колебаний, зависящих от массы ВВ на одну ступень замедления, приведённых на рисунке 2.10, получаем хорошую сходимость изменения частот всех трех составляющих. Описывая данные зависимости, можно отметить, что с увеличением массы одновременно взрываемого заряда частота колебания грунта в СВВ снижается, что является естественным

результатом проявления масштабного фактора взрыва. На графике видно, что при одновременном взрывании заряда массой больше 13 кг частота колебаний начинает явно снижаться.

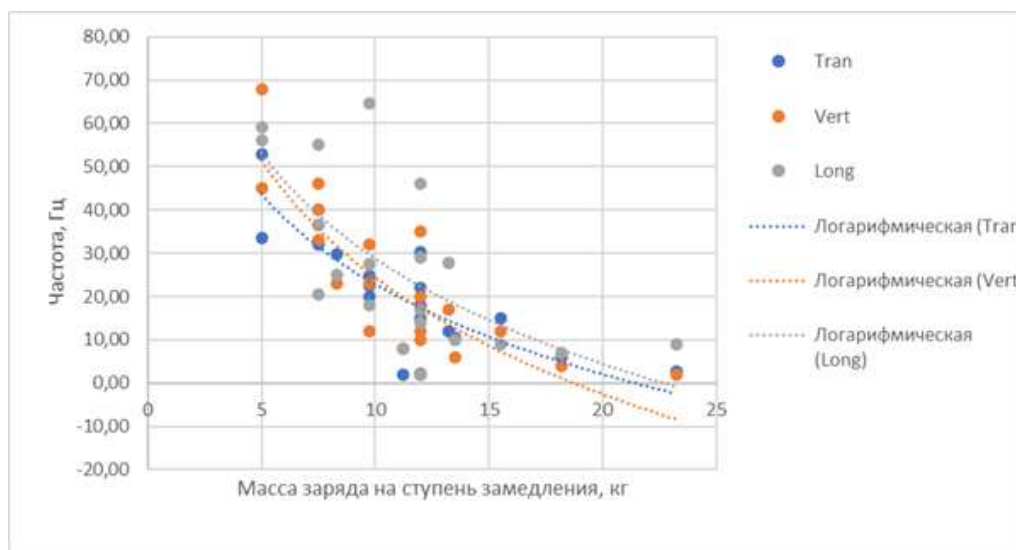


Рисунок 2.10 – Зависимость частоты, на которой зарегистрирован максимум амплитуды от массы одновременно взрывающегося заряда

Зависимость частоты спектрального максимума от массы ВВ в ступени замедления (условий ведения БВР) описывается уравнением (2.1):

$$f = -0.39 \lg(m) + 114 \quad (2.1)$$

где  $f$  – частота колебаний грунта в СВВ, Гц;  $m$  – масса одновременно взрывающегося заряда, кг.

Для составления уравнения 2.1 были использованы усреднённые значения частот по всем составляющим СВВ.

Чтобы сопоставить основные рассматриваемые в настоящей главе характеристики колебаний грунта в СВВ, был построен график, связывающий скорость колебания с частотами максимума амплитуды рисунок 2.10. Как уже говорилось, при прохождении сейсмической волны через породу, первичной характеристикой является частота колебаний. Наибольшие скорости колебаний достигаются на тех интервалах частот, которые наиболее характерны для данной породы. Возможно, имеет место явление, схожее с резонансом в границах целого массив.

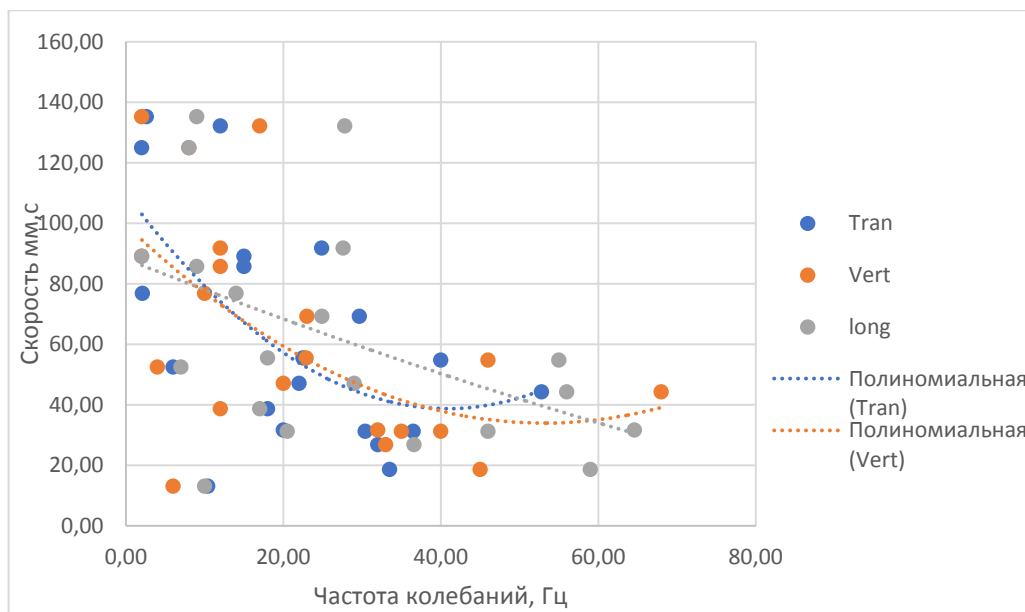


Рисунок 2.11 – Зависимость максимальной величины скорости колебаний грунта от частоты

По данным, представленным на рисунке 2.11, не выявляется четкая зависимость частотных характеристик от скорости смещения грунта. Но видно, что для данной породы скорость колебания (значения максимальной скорости колебания при каждом, отдельно взятом, событии) зависит от частоты, на которой был зарегистрирован максимум амплитуды колебаний. Видно, что максимальные скорости достигаются на низких частотах меньше 30 Гц. С увеличением частоты, соответствующей максимальной амплитуде, значение скорости уменьшается.

Обратная зависимость скорости от частоты, вытекающая из рисунка 2.11, предсказуема - учитывая результаты аппроксимации значений частоты, показанные на рисунке 2.10, частота колебаний почвы в основании газопровода на прямую зависит от массы ВВ в степени замедления.

Кроме того, как уже упоминалось ранее, колебания на низких частотах более опасны, как для наземных охраняемых объектов, так и для подземных (углубленных). Полиномиальная аппроксимация показала, что при увеличении скорости частота колебаний по всем компонентам уменьшается.

Видно, что большую скорость на низких частотах развивает радиальная составляющая скорости смещения – *long*. Эту кривую можно описать

уравнением (2.2):

$$U = 0,002f^2 - 1,03f + 88 \quad (2.2)$$

где  $U$  – скорость колебаний грунта в СВВ, мм/с;  $f$  – частота колебаний, Гц.

Таким образом, уравнение (2.2) описывает зависимость скорости колебаний грунта в сейсмозрывной волне от частоты колебаний.

#### **2.4. Выводы по главе 2**

Собственная частота колебаний многоэтажных зданий находится в низкочастотном диапазоне (до 20 Гц) и может быть определена эмпирическим путем или путем моделирования и математических расчетов. «Вопрос определения резонансной частоты для наземных сооружений в настоящее время является актуальным и достаточно изученным в связи с тем, что эти данные используются в качестве параметров для различных прочностных расчётов. В частности, для расчёта ветровой нагрузки. Таким образом, для надземных газопроводов частоту собственных колебаний можно определять, руководствуясь РТМ 38.001-94 Указания по расчёту на прочность и вибрацию технологических стальных газопроводов.

Вследствие того, что подземные газопроводы, кладутся на песчаную подушку и к тому же засыпаются песком, возникновение резонанса для них менее вероятно, чем для надземных газопроводов. Независимо от этого, в условиях мерзлого грунта или при повышенном вибрационном воздействии сейсмозрывных волн, явление резонанса может наблюдаться и для подземных газопроводов.

Из-за значительного числа параметров и особых условий прокладки каждого газопровода не существует документа, регламентирующего расчет собственной частоты колебаний подземных газопроводов.

Данные расчеты можно выполнить только по результатам моделирования, каждых конкретных условий для конкретного газопровода с известными параметрами, в современных компьютерных программах, которые могут с высокой точностью моделировать свойства материалов и конструкций и учитывать их взаимодействие» [10].



Эти расчеты позволят определить массу ВВ в ступени замедления, не вызывающей резонансного эффекта в газопроводе. Дополнив эти данные информацией о максимально допустимых значениях амплитуды, мы можем определить наиболее приемлемую с точки зрения сейсмической безопасности величину заряда на ступень замедления.

Отходя от рассмотрения подземных сооружений (газопроводов, коллекторов, шахт и т.п.), важно отметить, что вопрос о влиянии частоты колебаний грунта на близлежащие сооружения при производстве БВР изучался в меньшей степени, чем влияние других параметров СВВ, таких как скорость и ускорение колебаний грунта в сейсмозрывной волне, если рассматривать вопрос измерения и прогнозирования частоты колебаний, с другой стороны, то умение определять наиболее опасную частоту колебаний для конкретного сооружения или объекта и способность прогнозировать и управлять частотой колебаний при производимых взрывных работах поможет более эффективно рассчитывать параметры БВР при сносе и разрушении отдельных элементов конструкции или конструкции целиком.

Основными результатами данного этапа исследований следует считать:

1. Показано, что при производстве массовых взрывов в скальных грунтах при сооружении траншеи под прокладку газопровода преобладающая частота колебаний составляет  $\approx 20$  Гц.

2. Эмпирически получена зависимость максимальной спектральной частоты от величины массы ВВ в ступени замедления. Показано, что с увеличением массы одновременного взрываемого заряда, частота, соответствующая максимальной амплитуде, уменьшается  $f = -0.39 \lg(m) + 114$ . С увеличением массы зарядов в ступени замедления до 50 кг основная частота колебаний снижается до 3 Гц.

3. Максимальные скорости колебаний грунта достигаются при частоте колебания ниже 30 Гц. С увеличением частоты значения максимальных скоростей снижаются  $U = 0,002f^2 - 1,03f + 88$ .

### **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ ИХ РЕГИСТРАЦИИ**

#### **3.1. Условия проведения экспериментальных исследований по определению сейсмобезопасных параметров БВР при проходке траншеи вдоль газопровода в Ленинградской области**

Для проведения работ по изучению воздействия сейсмозрывной волны на охраняемый объект, расположенный в непосредственной близости от взрыва. Был выбран объект по проходке траншеи вдоль действующего газопровода «МГ «Ленинград-Выборг-Госграница 1» от 134.0 до 158.0 км в Портовом ЛПУМГ, Выборгском районе, Ленинградской области».

Выборгский район, в котором производились взрывные работы расположен на северо-западе Ленинградской области. Геологические условия Балтийского щита, где близко к поверхности выходят породы раннепротерозойского периода. Породы покрыты озёрными и озёрно-аллювиальными отложениями четвертичного периода. Большая часть района входит в Балтийско-Ладожский ландшафтный округ, где преобладает равнинная местность, с характерными ледниковыми формами рельефа.

На территории района имеется множество месторождений гранитов, торфа, песков. Также наличием месторождений своеобразных сапропелевых грязей (так называемых гостий), сформировавшихся 5-7 тысяч лет назад и залегающих вдоль Финского залива.

##### **3.1.1. Климатические и геологические условия ведения БВР**

Выборгский район располагается у северной границы южно-таежной подзоны.

В лесах произрастают в основном хвойные породы деревьев – сосны и ели. В настоящее время часть территории занята вторичными мелколиственными лесами – березовыми, ольховыми и осиновыми, возникшими на месте вырубок и пожаров хвойных лесов.

На территории Выборгского района находится много озер. Особенно их много в Вуоксинской низменности – на северо-востоке, а также в

восточной части района. Самые крупные озера: Вуокса, Глубокое, Нахимовское, Пионерское, Красногвардейское. По северо-восточной части района протекает река Вуокса. Остальные реки небольшие, представляют протоки между озерами. Наиболее значительные – Петровка, вытекающая из озера Кирилловского, Волочаевка, впадающая в озеро Правдинское.

Климат района морской с переходом к континентальному. Зима умеренно мягкая. Средние температуры февраля  $-8^{\circ}\text{C}$ . Лето умеренно теплое. Средняя температура июля  $+17^{\circ}\text{C}$ . Район находится в зоне избыточного увлажнения. Осадки выпадают до 700 мм в год.

В геоморфологическом отношении изучаемый участок трассы расположен в пределах низкого грядового и холмистого рельефа на кристаллических породах со сплошным, реже прерывистым чехлом морены. Трасса протягивается в субмеридиональном направлении с юга на север на 24,0 км. Абсолютные отметки поверхности находятся в пределах 17,0-64,8 м. Рассматриваемая территория характеризуется умеренным избыточно-влажным климатом с неустойчивым погодным режимом и относится ко II<sup>Б</sup> подрайону по климатическому районированию России для целей строительства.

Инженерно-геологические условия трассы определяются широким развитием современных биогенных, верхнечетвертичных озерно-ледниковых и ледниковых отложений и протерозойскими гранитами.

Современные биогенные отложения  $b_{IV}$  – представлены торфами;

Верхнечетвертичные озерно-ледниковые отложения  $lg_{III}$  – представлены суглинками мягко- и тугопластичной консистенции;

Верхнечетвертичные ледниковые отложения  $g_{III}$  – представлены песками мелкими и пылеватыми, суглинками песчанистыми с гравием, галькой, валунами мягко- и тугопластичной консистенции, валунными и дресвяно-щебенистыми грунтами.

Протерозойские граниты  $PR$  – представлены гранитами розовато-серыми выветрелыми.

По результатам бурения и лабораторным определениям, в пределах изученности участка, выделены следующие инженерно-геологические элементы (ИГЭ):

ИГЭ – 1 – Торфы среднеразложившиеся коричневые с прослоями супеси влажные, вскрытой мощностью 0,5 м;

ИГЭ – 2 – Суглинки легкие пылеватые бурые с прослоями песка мягкопластичные, вскрытой мощностью 0,3-1,1 м;

ИГЭ – 3 – Суглинки легкие пылеватые бурые с прослоями песка тугопластичные, вскрытой мощностью 0,4-2,9 м;

ИГЭ – 4 – Пески пылеватые коричневато-серые с гравием, галькой, валунами плотные влажные и насыщенные водой, вскрытой мощностью 0,4-3,0 м;

ИГЭ – 5 – Пески мелкие коричневато-серые с гравием, галькой, валунами влажные и насыщенные водой, вскрытой мощностью 0,5-2,9 м;

ИГЭ – 6 – Суглинки легкие песчанистые коричневато-серые с гравием, галькой до 20% с валунами мягкопластичные, вскрытой мощностью 0,4-5,4 м;

ИГЭ – 7 – Суглинки легкие песчанистые коричневато-серые с гравием, галькой до 25% с валунами тугопластичные, вскрытой мощностью 0,4-3,0 м;

ИГЭ – 8 – Основа – валунные грунты, заполнитель – супеси песчанистые коричневато-серые с гравием, пластичные, вскрытой мощностью 0,6-2,2 м;

ИГЭ – 9 – Основа – дресвяно-щебенистые грунты, заполнитель – пески мелкие коричневато-серые с гравием плотные, вскрытой мощностью 0,4-2,5 м;

ИГЭ – 10 – Граниты розовато-серые выветрелые, трещиноватые, вскрытой мощностью 0,1-5,1 м.

### **3.1.2. Технологические условия ведения БВР**

Буровзрывные работы ведутся с применением шпуровых и скважинных зарядов рыхления небольшой массы. Взрывной блок укрывается толщей

песка высотой в один метр, затем производится армирование сеткой рабица, и снова насыпается один метр песка. Инициирование зарядов производится неэлектрической системой инициирования ИСКРА-П. Минимальное расстояние от ближайшего ряда зарядов составляет 18 метров.

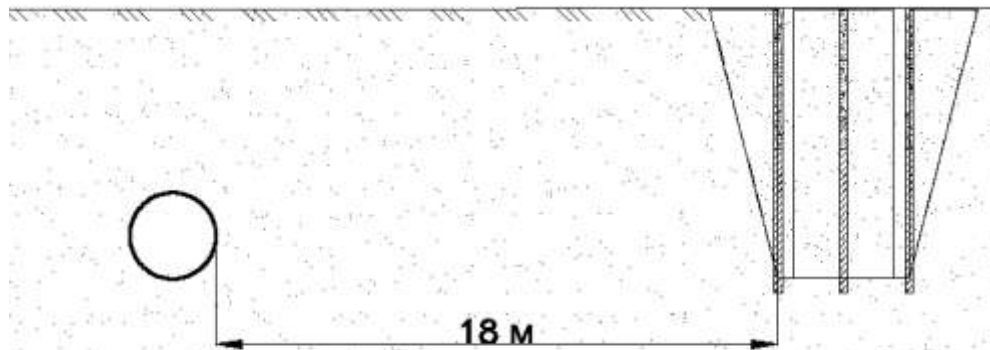


Рисунок 3.1 – Расположение газопровода и зарядов, вертикальный срез [12]

Взрываемые породы сложены, гранитами с крепостью 16 по шкале профессора Протодяконова. Трещиноватость пород классифицируется как III-IV. Диаметр взрывных скважин рассчитан, исходя из технико-экономических параметров БВР и равен 70 мм.

Параметры зарядов рыхления были рассчитаны на основе нормативных документов и представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры зарядов рыхления

№ п/п	Наименование показателей	Обозначение	Единицы измерения	Показатели
1	Средняя глубина выемки	$H$	м	1,03
2	Диаметр скважин	$D$	мм	70
3	Количество скважин:	$N$	шт	312
4	Сопротивление по подошве	$W_p$	м	1,8
5	Сетка бурения скважин: - расстояние между скважинами	$A$	м	1,8
	- расстояние между рядами скважин	$B$		1,5

## Продолжение таблицы 3.1

№ п/п	Наименование показателей	Обозначение	Единицы измерения	Показатели
6	Средняя глубина скважины	$l_{скв} = H + l_{пер}$	м	1,53
7	Средняя длина заряда	$l_{зар} = l_{скв} - l_{заб}$	м	0,8
8	Средняя длина забойки	$l_{заб} = l_{скв} - l_{зар}$	м	0,73
9	Коэффициент заполнения скважин	$\eta_3 = \frac{l_{скв}}{l_{заб}}$	—	0,56
10	Общая масса скважинных зарядов	$\sum Q_{бл}$	кг	854
11	Общая длина взрывааемых скважин	$\sum l_{скв}$	п. м.	478

Конструкция заряда представлена на рисунке 3.2.

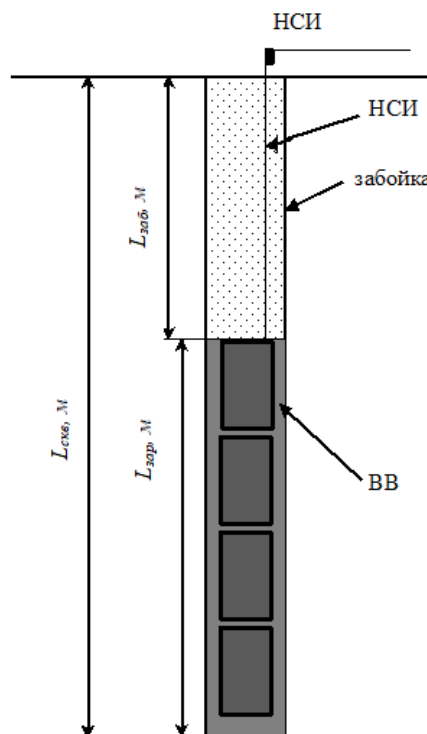


Рисунок 3.2 – Конструкция скважинного заряда рыхления

В качестве взрывчатого вещества используется аммиачно-селитренная эмульсия в патронированном виде: Нитронит – ПАС-60. Инициирование производится неэлектрической системой ИСКРА. В качестве патрона боевика также выступает патрон Нитронита – ПАС 60 с установленным скважинным детонатором ИСКРА.

Условия ведения взрывных работ подразумевают попадание в опасную зону по действию взрыва различного рода охраняемых объектов. Помимо

Газопровода «Ленинград-Выборг-Госграница 1» расстояние, до которого варьируется от 18 до 30 метров, попадает и линия электропередач, идущая параллельно по всей протяженности взрываемого участка. Вследствие чего проектом предусмотрено применение газонепроницаемого насыпного укрытия. В качестве укрывного материала применяется песок.

### 3.2. Распределение сейсмозрывных волн с увеличением глубины залегания охраняемого объекта

Известно, что сейсмозрывная волна регистрируемая, на поверхности отличается от волны, проходящей в толще горных пород. Это явление связано с неоднородностью сейсмической волны, состоящей из совокупности нескольких типов волн, разных по частоте и типу распространения.

Существуют объёмные  $S$ -волны и  $P$ -волны, а также поверхностные волны Релея и Лява (рисунок 3.3).

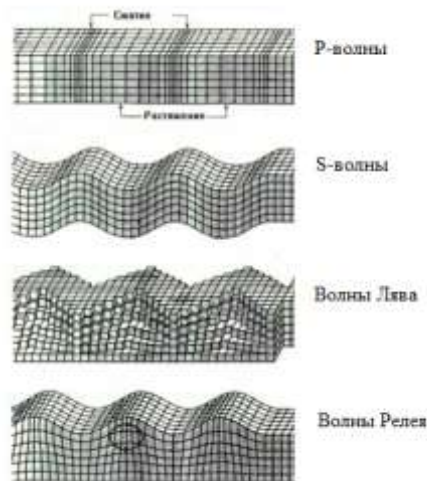


Рисунок 3.3 – Типы сейсмических волн

Первый вид объемной волны — это  $P$ -волна или первичная волна. Это высокоскоростная волна первая, приходящая на измерительную аппаратуру. Волна  $P$  может проходить через твердые породы и жидкости. Она толкает и тянет горную породу, через которую проходит, создавая перед собой зону сжатия, а за собой зону растяжения. Вторым типом объемной волны является  $S$ -волна или вторичная волна.  $S$ -волна медленнее  $P$ -волны и может двигаться только через твердую породу.  $S$ -волны перемещают частицы породы вверх и

вниз или из стороны в сторону-перпендикулярно направлению движения волны.

Поверхностные волны имеют более низкую частоту, чем объемные волны, и в результате легко уловимы на сейсмограммах. Хотя они приходят после объемных волн, именно поверхностные волны почти полностью ответственны за ущерб и разрушения, связанные с сейсмическим эффектом. Первый вид поверхностной волны называется волной Лява, названной в честь А.Е.Х. Лява, британского математика, который разработал математическую модель для этого вида волны в 1911 году. Это самая быстрая поверхностная волна, которая смещает горную породу из стороны в сторону. Ограниченные поверхностью земной коры, волны Лява производят полностью горизонтальное движение. Другой вид поверхностной волны-волна Рэлея, названная в честь Джона Уильяма Стратта, лорда Рэлея, который математически предсказал существование этого вида волны в 1885 году. Волна Рэлея катится по земле точно так же, как волна катится по водной глади. Поскольку она катится, она смещает горную породу вверх и вниз и из стороны в сторону в том же направлении, в котором движется волна. Большая часть сейсмического воздействия, оказываемого на охраняемые объекты, вызваны волной Рэлея, которая может быть намного больше, чем другие волны.

После инициирования взрывчатого вещества, давление взрыва формирует ударную волну сжатия, распространяясь со сверхзвуковой скоростью, волна сжатия мгновенно меняет состояние среды. По мнению большинства исследователей [12, 43, 34, 52, 83], ударная волна, резко теряя свою энергию преобразуется в волну сжатия уже на расстояниях равных от трех до семи радиусов заряда. Волна сжатия имеет скорость распространения равную скорости звука, вследствие чего она вызывает неупругое возмущение горной породы, где параметры состояния среды меняются достаточно плавно, а время изменения положения вещества меньше времени возвращения его к состоянию покоя.



Горная порода, в области распространения волны сжатия, ведет себя не упруго и в ней возникают остаточные деформации. Зона распространения остаточных деформаций по В.Н. Мосинцу [35] варьируется от 100 до 150 радиусов заряда, именно эти размеры можно отнести к размерам средней сейсмической зоны [11].

Проходя дальше, волна сжатия также постепенно теряет свою энергию и трансформируется в сейсмическую волну. В зоне действия сейсмической волны параметры среды практически не меняются.

Эта зона возникает на расстояниях более 150 радиусов заряда, ее область распространения оценивается массой заряда  $ВВ$  и физико-механическими свойствами горной породы [35].

Вышеизложенное поведение взрывной волны проиллюстрировано на рисунке 3.4.

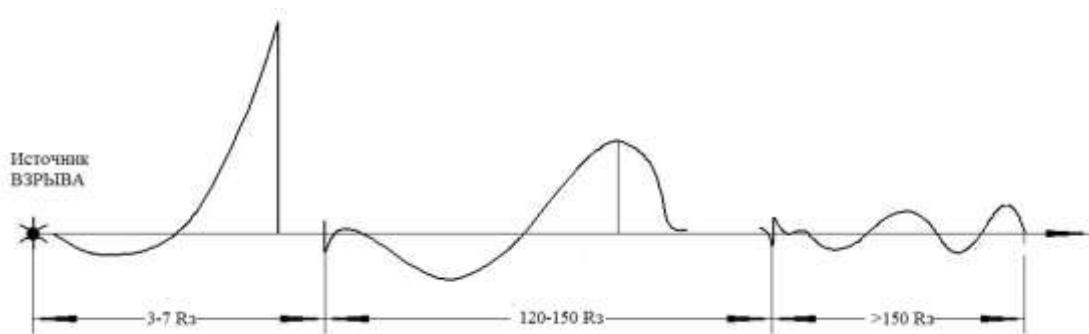


Рисунок 3.4 – Зоны изменения характера волны [35, 36].

Таким образом, можно условно выделить три области действия взрывных волн, в которых явно прослеживаются отличия в форме волны и условия распространения в массиве горных пород. Согласно [100], в первой области, области ударных волн затухание напряжений подчиняется примерно кубической зависимости  $(R/r_0)^3$ , во второй (средней) области, области сжатия, – применяется квадратичная зависимость  $(R/r_0)^2$ , в области сейсмических волн – зависимость близка к линейной  $(R/r_0)$ .

Согласно выводам из [100] для определения пиковой массовой скорости колебания частиц горной породы можно применить дополненную формулу М.А. Садовского (3.1):

$$V = \frac{K_c a_1 a_2 \sqrt[3]{Q^2}}{r^2} \quad (3.1)$$

где  $Q$  – масса одновременно взрываемого заряда, кг;  $r$  – расстояние до источника взрыва, м;  $\alpha_1$  – коэффициент, учитывающий число открытых поверхностей;  $\alpha_2$  – коэффициент, учитывающий глубину нахождения рассматриваемой точки ( $\alpha_2 = 1$  на поверхности и на глубине 2–3 м  $\alpha_2 = 0,5$ );  $K_c$  – коэффициент сейсмичности.

Математическое подтверждение коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  не нашло отражение в представленной работе. В связи, с чем возникает необходимость в проведении экспериментального исследования по определению математической зависимости изменения амплитуды колебаний, регистрируемых на поверхности относительно амплитуды сигнала, получаемого датчиком на глубине.

В рамках экспериментального исследования разницы поверхностных значений амплитудных колебаний относительно глубины залегания газопровода было запланировано и проведено 5 экспериментальных взрывов одиночных зарядов ВВ массой 1 кг. Расстояние от измерительной аппаратуры до зарядов варьировалось от 13 до 25 метров.

Геологические условия проведения эксперимента, были схожими с геологическими условиями при проходке траншеи под трубу газопровода. Сам эксперимент проводился непосредственно перед началом основных буровзрывных работ.

Эксперимент включал в себя:

1. Выполнение инструментальных исследований по выбору и обоснованию оптимальной массы заряда взрывчатого вещества.
2. Уточнение численных параметров коэффициентов сейсмичности и затухания сейсмозрывных волн.
3. Уточнение расчетных аналитических зависимостей по определению закона затухания параметров сейсмозрывных волн с расстоянием от места взрыва для проектной массы взрываемого заряда.

### 3.3. Проведение тарировки акселерометров

При проведении мониторинга ведения буровзрывных работ, в опасной зоне действующего газопровода возможно исключены какие-либо работы на расстоянии в двадцать пять метров от оси газопровода. Что влечет за собой применение только поверхностной аппаратуры для регистрации сигнала, и вынуждает исследователя использовать многоканальный метод исследования, проведя сравнительную оценку воздействия одиночного взрыва, как на поверхности, так и на глубине. В качестве измерительных преобразователей для углубленных датчиков были использованы деформационно-защищенные акселерометры конструкции, адаптированные к условиям горного производства.

Внешний вид акселерометра и строение пьезо-датчика представлены на рисунках 3.5 и 3.6.

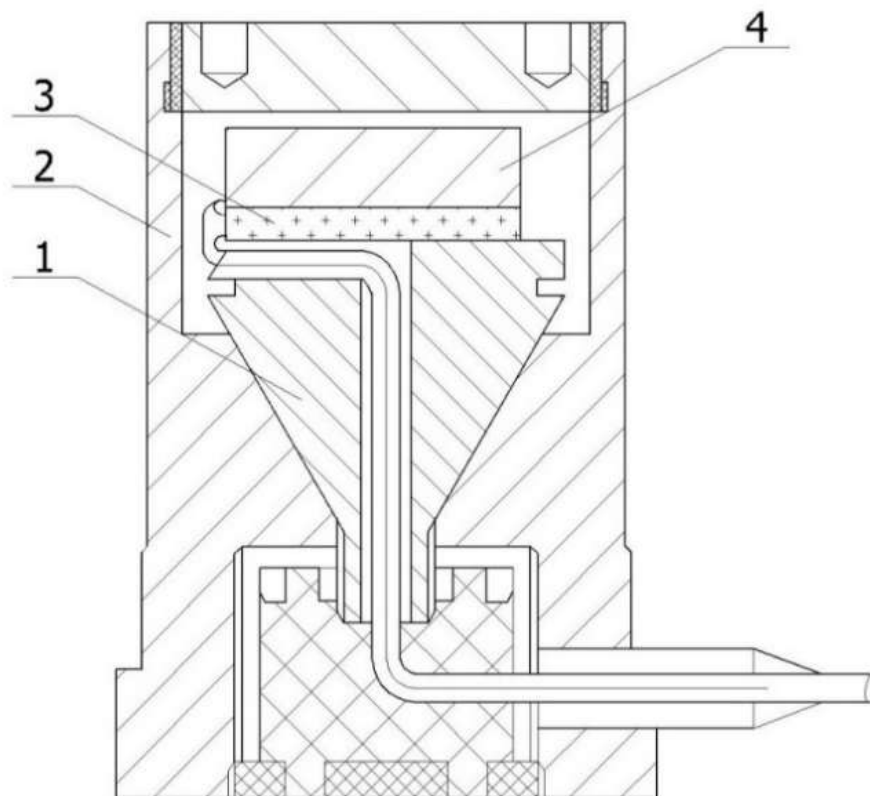


Рисунок 3.5 – Схема однокомпонентного пьезо-датчика (акселерометра)  
 1 –сердечник стальной; 2 –ударопрочный корпус; 3 – пьезоэлектрические пластичны; 4 – инерционная масса [10]



Рисунок 3.6 – Внешний вид датчика

На базе Санкт-петербургского Горного университета были произведены пьезоэлектрические акселерометры, применяемые при проведении экспериментальных исследований. Изготовленные датчики предварительно прошли динамическую тарировку, на лабораторных установках кафедры взрывного дела Санкт-Петербургского Горного университета. Путем сравнения тарируемого датчика, с имеющим свидетельство о приемке и технический паспорт акселерометром BRUEL & KJAER 8340. Для этих целей использовался ударный стенд, представленный на рисунке 3.7



Рисунок 3.7 – Фотография лабораторной установки, на которой проводилась тарировка акселерометров

Ударный стенд, представленный на рисунке 3.7, состоит из следующих основных элементов: 1. запускаемый баллистический маятник с ручным пускателем. 2. принимающий механический волновод (красный цилиндр).

При тарировке, методом сравнения, однокомпонентные пьезо-датчики и образцовый BRUEL & KJAER 8340 устанавливались в посадочные гнезда, находящиеся в верхней части принимающего механического волновода.

Технические характеристики лабораторной установки приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики ударного стенда [10]

№	Параметры	Единицы измерения	Значения
1	Амплитуда ускорения	G	от 100 до 3000
2	Длительность полуволны Длина провода: -110 мм  -1200 мм	Мкс	50
			250
3	Воспроизводимость: по амплитуде,  по длительности	%	5
			10
4	Отклонение начального положения маятника	градусы	$\pm 0,5$
5	Неравномерность поля ускорения по торцу волновода	%	Менее 5

Акселерометр типа 8340 является пьезоэлектрическим кольцевым акселерометром Shear с встроенной электроникой. Датчик имеет верхний 2-контактный разъем MIL-C-5015, изолированный корпус и герметичную оболочку из нержавеющей стали для защиты от влияния внешней среды или влажности. Акселерометры типа 8340 монтируются с помощью шпилек, ввинчиваемых в отверстие с резьбой  $\frac{1}{4}$ " -28UNF. Стальные шпильки поставляются в комплекте с акселерометром. Датчик обладает высокой чувствительностью и хорошим отношением "сигнал-шум" и разработан специально для измерений на крупных конструкциях при очень низких частотах и в условиях слабой сейсмической активности [8].

Основные характеристики эталонного преобразователя представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Основные характеристики BRUEL & KJAER 8340 [10]

Характеристики	Единицы измерения	8340	
Динамические характеристики			
Чувствительность по напряжению (на частоте 159.2 Гц)	В/мс <sup>-2</sup> (В/г)	1 +12/-8% (10 ±10%)	
Диапазон измерений	мс <sup>-2</sup> (г)	± 4.9 (± 0.5)	
Характеристики	Единицы измерения	8340	
Частотная характеристика (типовая)		См. амплитудную и фазовую характеристику	
Резонансная частота установленного акселерометра	кГц	7	
Амплитудная характеристика ±10%	Гц	от 0.1 до 1500	
Остаточный шум, широкополосный	μг	25	
Остаточный шум, составляющая на частоте 0.1 Гц	μг/√Гц	1.5	
Остаточный шум, составляющая на частоте 55 Гц	μг/√Гц	1.5	
Остаточный шум, составляющая на частоте 300 Гц	μг/√Гц	0.05	
Остаточный шум, составляющая на частоте 1000 Гц	μг/√Гц	0.05	
Поперечная чувствительность	%	< 1	
Электрические характеристики			
Полное выходное сопротивление	Ом	< 200	
Постоянное напряжение смещения на выходе	При комнатной температуре	В	12 ±1
	В заданном диапазоне температур	В	от 10 до 14
Ток источника питания	мА	2 to 20	
Время запуска	Сек	~8	
Заземление		Изолированный корпус	
Характеристики окружающей среды			
Диапазон температур	°С (°F)	от -51 до +74 (от -60 до +165)	

## Продолжение таблицы 3.3

Характеристики	Единицы измерения	8340
Влажность		Герметичный
Максимальная синусоидальная вибрация в рабочем режиме (пиковое значение)	$\text{мс}^{-2}$ (g)(пиковое)	$\pm 4.9 (\pm 0.5)$
Максимальный удар (пиковое значение)	$\text{мс}^{-2}$ (g) (пиковое)	980 (100)
Чувствительность к деформации основания	Эквив. деформации $\text{мс}^{-2}/\mu$	0.0002
Коэффициент температурной чувствительности	эквив. $\%/^{\circ}\text{C}$ ( $\%/^{\circ}\text{F}$ )	0.25 (0.14)
Магнитная чувствительность (50 Гц — 0.03 Тл)	$\text{мс}^{-2}/\text{Тл}$ (g/T)	0.7 (0.07)
Физические характеристики		
Габариты		См. габаритный чертеж
Масса	грамм (унция)	775 (22.3)
Материал корпуса		Нержавеющая сталь
Разъем		2-контактный разъем MIL-C-5015
Монтаж		отверстие с резьбой $\frac{1}{4}'' .28\text{UNF}$
Момент затяжки при монтаже	Нм (фунт с.-дюйм)	5 (44)



Рисунок 3.8 – Внешний вид BRUEL &amp; KJAER 8340

По итогам тарировки датчиков, были выбраны 4 подходящих по диаметру скважины и чувствительности. В таблице 3.4 представлены результаты тарировки, зеленым цветом отмечены выбранные датчики и кабеля удлинители, используемые при экспериментальных исследованиях.

Таблица 3.4 – Результаты тарировки датчиков

Номер датчика	Эталонный $V_{\text{э}}$	Датчик	Провод 1	Провод 2	Провод 3	Чувствительность
8	5	0,09	0,006	0,007	0,012	0,675
1	5	0,0088	0,0028	0,0032	0,005	0,066
<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4,4</b>	<b>1,43</b>	<b>1,8</b>	<b>2,5</b>	<b>0,213</b>
7	5	3	1,15	1,3	1,8	22,5
<b>10</b>	<b>5</b>	<b>2,14</b>	<b>0,062</b>	<b>0,082</b>	<b>1,18</b>	<b>16,05</b>
11	5	2,84	1,31	1,41	2,05	0,21
3	5	0,025	0,0013	0,0014	0,0023	0,1875
<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3,86</b>	<b>1,1</b>	<b>1,27</b>	<b>2</b>	<b>0,21</b>
4	5	3	0,052	0,052	0,09	0,22
<b>5</b>	<b>5</b>	<b>3,96</b>	<b>1,15</b>	<b>1,4</b>	<b>1,9</b>	<b>29,7</b>

Для записи аппаратного аналогового сигнала применялся четырехканальный электронный осциллограф «Tektronix». Данные переводились сразу на съемный Flash накопитель. В дальнейшем обработка полученных осциллографом записей производилась при помощи программного комплексе Microsoft Excel.

### 3.4. Порядок проведение измерений

Основной сложностью разработки данного проекта являлось обеспечение сейсмической безопасности действующего магистрального газопровода «Nord Stream» Ленинград-Выборг-Госграница-1,2».

Вблизи работающей магистральной ветки газопровода существует опасная зона равная двадцати пяти метрам в обе стороны от прямого участка трубы, в которой запрещены лютые виды механических работ. Буровзрывные работы проводились на границе данной зоны, что повлекло за собой необходимость прогнозирования сейсмозрывного воздействия на трубу действующего газопровода.



Для получения данных о разности сейсмических колебаний на поверхности и на различной глубине предварительно было пробурено 4 попарно дублированных скважин на глубинах в 1 и 2 метра. С учетом того, что заряд массой 1 килограмм, был также помещен на глубину в 1 метр на рисунке 3.9.

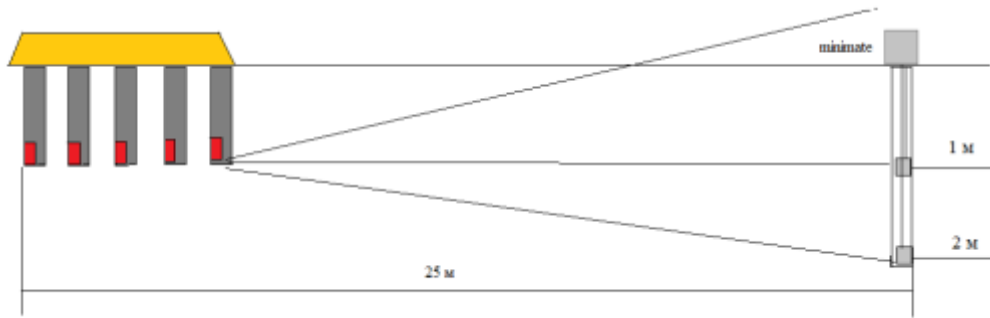


Рисунок 3.9 – Схема регистрации сейсмического сигнала

1. Намеченную площадку для проведения эксперимента зачищают от вскрышных пород, для установки поверхностного датчика непосредственно на взрываемую скальную породу.

2. Пробурируется ряд равноудаленных скважин на глубину (равную глубине залегания газопровода) перпендикулярно намеченной линии установки измерительной аппаратуры (для проводимого эксперимента глубина взрывной свежины составляла 2 метра от поверхности, или 1 метр от устанавливаемого поверхностного датчика).

3. В зоне установки измерительной аппаратуры пробуривают две пары скважин соответствующей глубины. В эти скважины устанавливается акселерометр и крепится на быстро застывающий гипсовый состав (алебастр). Акселерометры подсоединяются к регистрирующему комплексу с использованием радиочастотного антивибрационного кабеля марки АВК – 100.

Мы получаем следующую картину: поверхностные датчики получают данные о поверхностной волне, в тоже время 2 акселерометра принимают сигнал на глубине заложения заряда, еще 2 датчика фиксируют сейсмическую волну на глубине 2 метра. Схема регистрации сейсмического сигнала представлена на рисунках 3.10 и 3.11.

4. Поверхностный датчик также устанавливают на одной оси с углубленными.

5. Производится тестовый запуск и проверка готовности всех элементов измерительной аппаратуры.

6. Осуществляется монтаж взрывных скважин, таким образом, чтобы каждый взрыв производился отдельным инициированием, над скважинами формируются укрытия из песка. По готовности зарядов к взрыванию, регистрирующий комплекс переводится в режим готовности, а оператор и участники эксперимента удаляются за пределы опасной зоны.

7. Рабочий режим регистрирующего комплекса – «Запись» данных, включается автоматически по приходу сейсмического сигнала, определенного уровня.

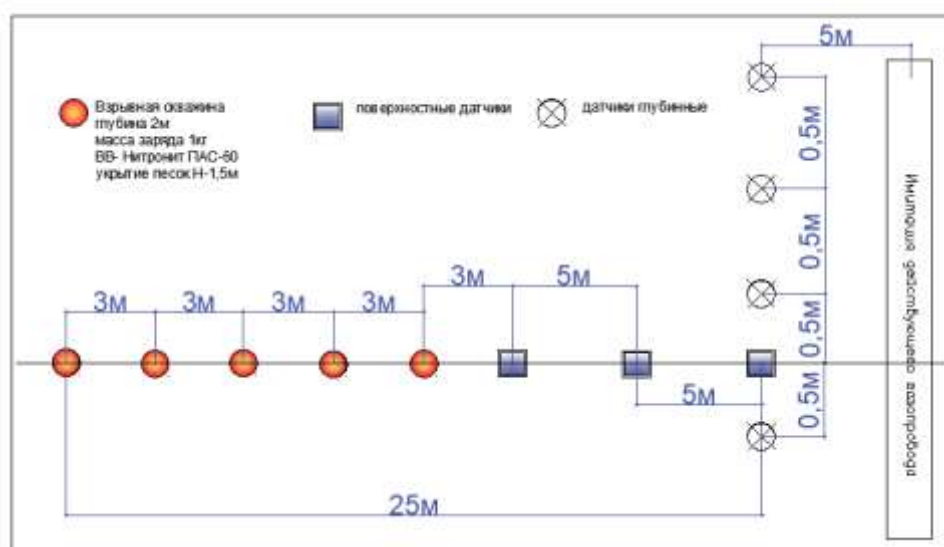


Рисунок 3.10 – Схема проведения экспериментального исследования [64]

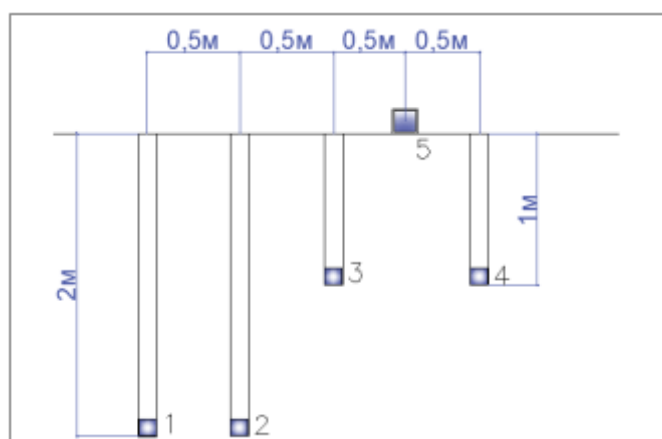


Рисунок 3.11 – Схема установки углубленных датчиков [64]



Рисунок 3.12 – Процесс подготовки эксперимента [64]



Рисунок 3.13 – Фотография установки пьезо-датчика  
в измерительную скважину [64]

Обработка полученных в ходе замеров данных производится автоматически. Значения амплитуды отклонения записывалось в мили вольтах, длительность периода отклонения в секундах и сохраняется на электронный Flash накопитель.

Значение скоростей смещения с датчика, находящегося на поверхности, автоматически сохраняются в виде велосиграммы в память прибора MinimatePlus.

Полученные в ходе мониторинга при строительстве Североевропейского газопровода в Выборгском районе Ленинградской области (Россия), приблизительные значения коэффициента сейсмичности ( $K_c=546$ ) и коэффициента затухания ( $n=2,4$ ) были проверены и пересчитаны для условий настоящего строительства.

### 3.5. Обработка полученных результатов от экспериментальных взрывов

Все экспериментальные взрывы были проведены в горных породах, сложенных в основном гранитами, гранито-гнейсами с крепостью по профессору М.М. Протодьяконову  $f=16$ .

Фактическая схема отличается от предложенной нами, не совершенство бурильного станка, привело к перебору скважины 2 и 3. Для более плотной установки датчиков, было решено устанавливать их строго на дно скважины, не создавая под ними дополнительную подушку из отсева для выравнивания высот. Это могло привести к нежелательным искажениям регистрации сигнала при взрывах.

Как было указано в предыдущем параграфе, в процессе экспериментальных исследований производилась регистрация ускорений смещения массива пород на различных глубинах и расстояниях от взрывов. Расстояния соответствуют 25, 22, 19, 16 и 13 метрам, а глубина регистрации 0, 1, и 2 метра. Один килограмм взрывчатого вещества Нитронит размещался в каждой из пяти взрывных скважин. Результаты данных замеров представлены на рисунке 3.15.

На рисунке 3.14, показан пример полученных ускорений в ходе первого взрыва на нем отражена амплитуда смещения в (g) относительно времени (в с).

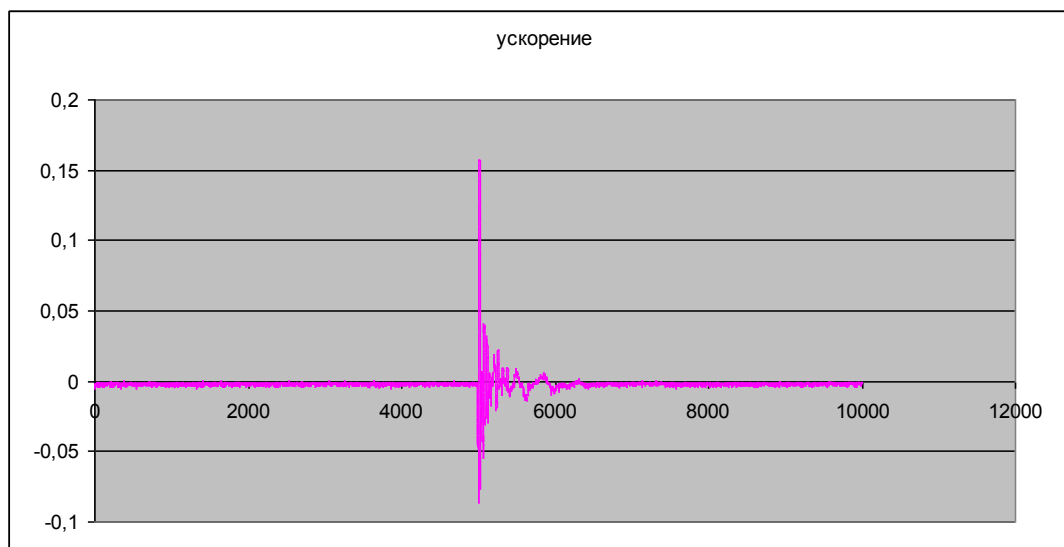


Рисунок 3.14 – Акселерограмма ускорения, экспериментальный взрыв №1

Данные, полученные в ходе проведения эксперимента сведены в таблицу 3.5

Таблица 3.5 – результаты измерений [64]

№ взрыва	Расстояние до точки регистрации, м	Глубина установки датчиков, м				
		2,2	2	1,1	1	0
1	25	0,12	0,13	0,22	0,26	0,37
2	22	0,18	0,2	0,33	0,39	0,56
3	19	0,27	0,29	0,48	0,58	0,82
4	16	0,42	0,46	0,76	0,91	1,3
5	13	0,74	0,8	1,32	1,6	2,27

По данным, таблицы 3.5, был построен сводный график отношения изменения амплитудных значений в (g), от изменения расстояния от взрыва до точки регистрации (в м). Каждая из аппроксимирующих кривых соответствует отдельной точке регистрации сигнала по глубине.

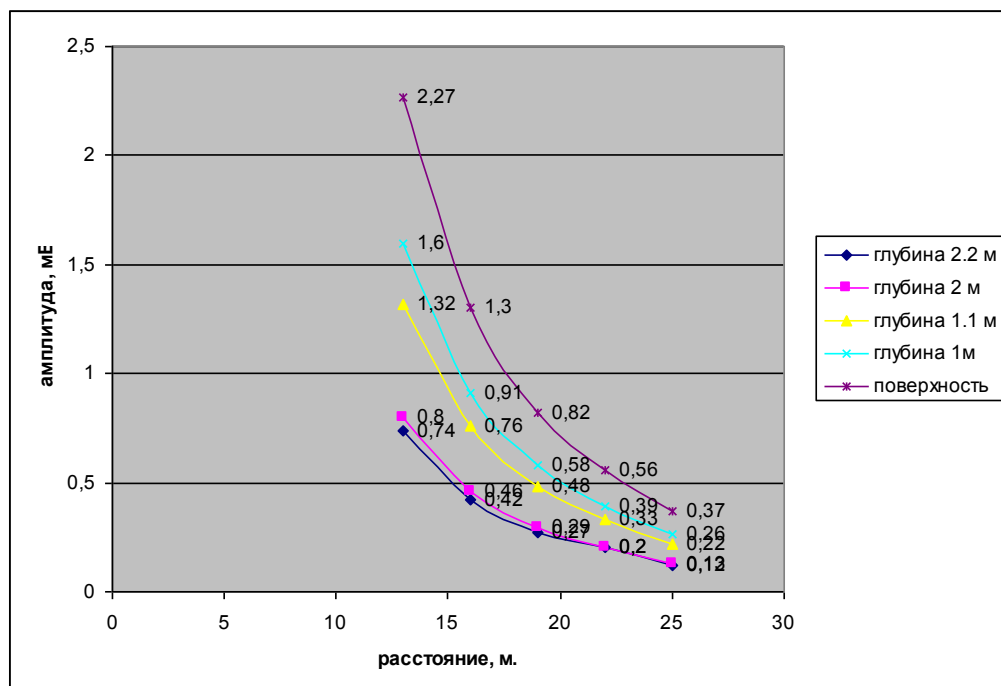


Рисунок 3.15 – Графическое отражение экспериментальных данных

На графике отчетливо видно заметное уменьшение амплитудных колебаний с увеличением глубины, а также более плавное изменение этих значений с увеличением расстояния. Это можно объяснить переходом сейсмической волны из ближней в среднюю сейсмическую зону, что вызывает изменение условий распространения сейсмических волн [35, 36].

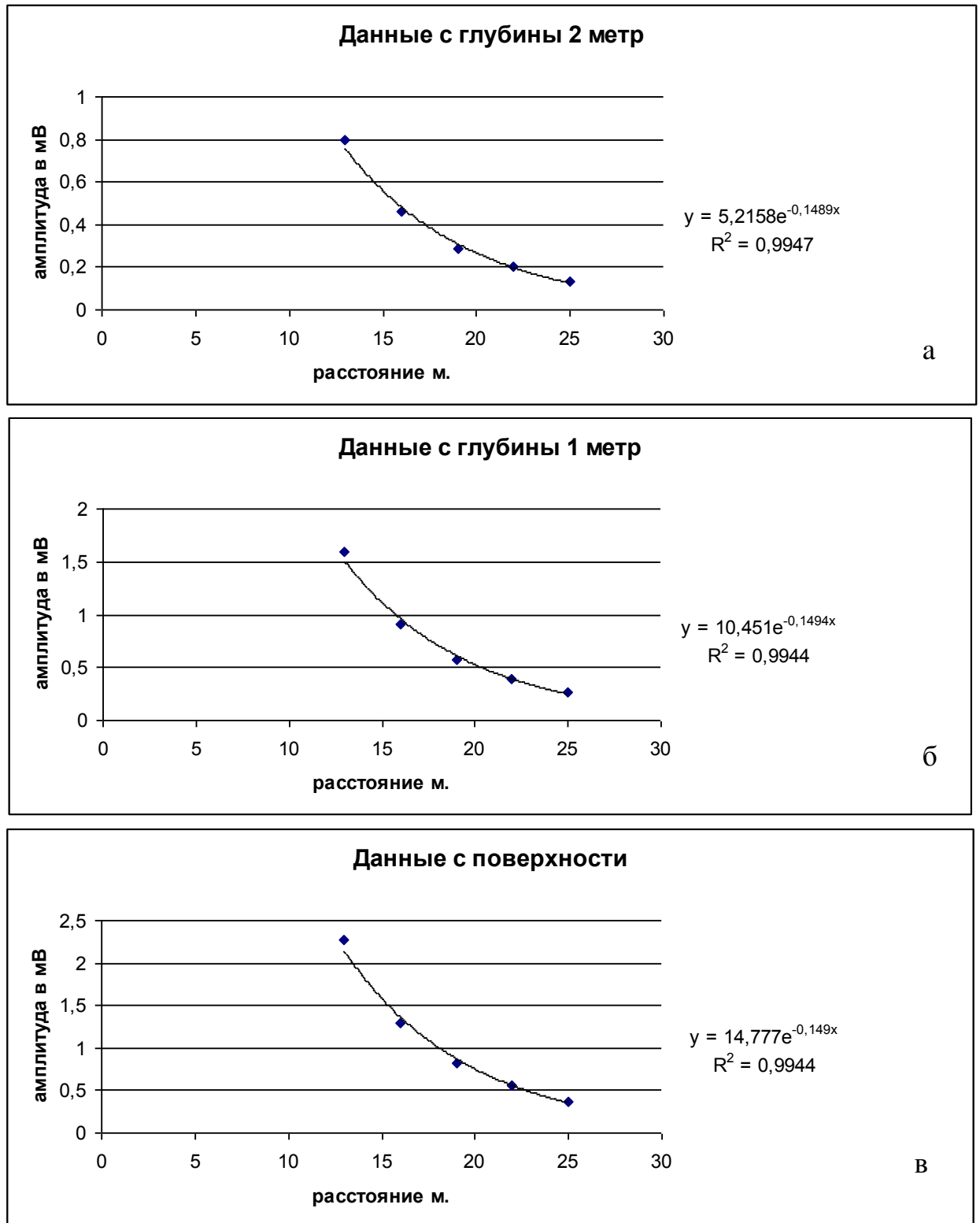


Рисунок 3.16 – Данные измерений ускорений на различных глубинах:

а – 2 метра; б – 1 метр; в – поверхность

Экспоненциальное уменьшение аппроксимирующей линии свидетельствует о характере изменения амплитудных значений с увеличением глубины регистрации:

На глубине 2 м:  $A_2 = f(R) = 5,2158e^{-0,1489R}$

На глубине 1 м:  $A_1 = f(R) = 10,451e^{-0,1494R}$

На поверхности:  $A_0 = f(R) = 14,777e^{-0,149R}$

Анализируя полученные зависимости, можно проследить отношение  $A_2$  к  $A_0$ , (3.2):

$$\frac{A_2}{A_0} = \frac{5,2158e^{-0,1489R}}{14,777e^{-0,149R}} \approx \frac{1}{3} \quad (3.2)$$

График зависимости амплитуды колебаний СВВ в зависимости от глубины (рисунок 3.15) представляет собой линейную зависимость общего вида (3.3):

$$A_0 = f(H) = KH + b \quad (3.3)$$

Математическое выражение для затухания значений амплитуды с увеличением глубины при определенных геологических условиях принимает следующие значение, графически интерпретация представлена на рисунке 3.17:

Расстояние 25 метров:  $A_0 = f(H) = -0,1152H + 0,3631$

Расстояние 23 метров:  $A_1 = f(H) = -0,1638H + 0,5583$

Расстояние 19 метров:  $A_2 = f(H) = -0,2531H + 0,8009$

Расстояние 16 метров:  $A_3 = f(H) = -0,4089H + 1,2973$

Расстояние 13 метров:  $A_4 = f(H) = -0,7103H + 2,277$

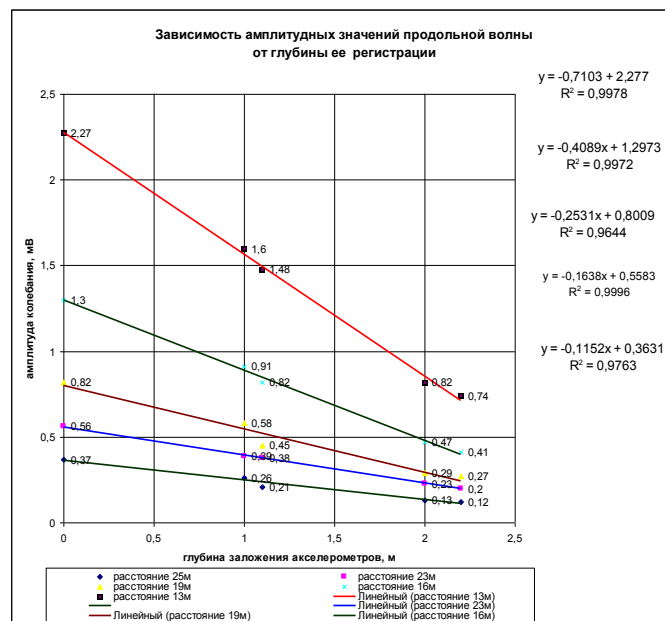


Рисунок 3.17 – Зависимость амплитуды от глубины

Проводя анализ рисунка 3.17 и дополненной формулы М.А. Садовского (3.1), была обнаружена значительная разница в углах наклона, что указывает на разную интенсивность затухания значений амплитуды на разных расстояниях. Скорее всего на малых расстояниях улавливаемая нами продольная волна усиливается быстро затухающей поверхностной волной (или волной Релея). С увеличением расстояния влияние волн Релея становится незначительным или полностью исчезает [35].

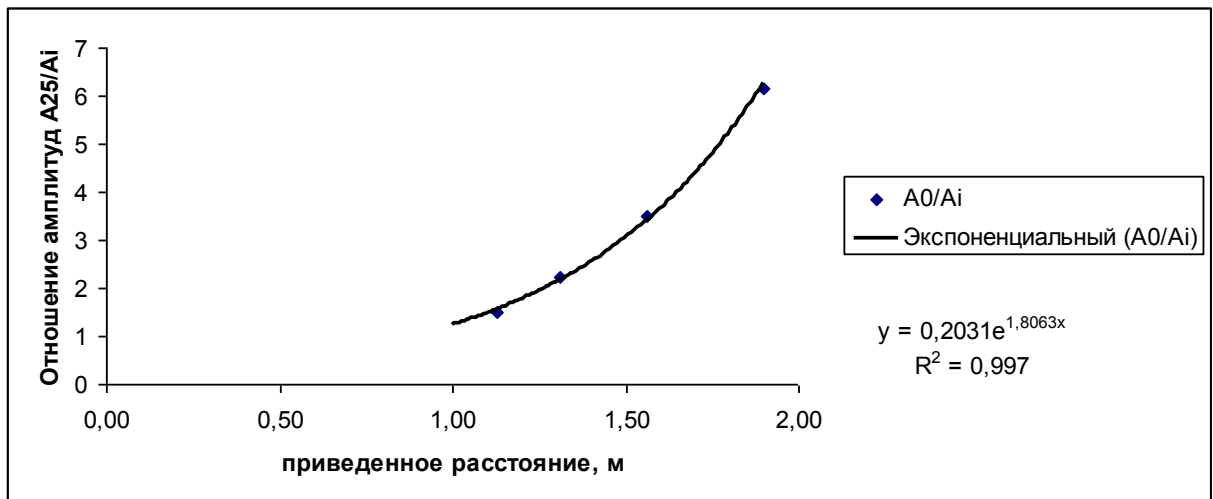


Рисунок 3.18 – Интенсивность затухания амплитудных значений от приведенного расстояния

$$\frac{A_0}{A_i} = f\left(\frac{R_0}{R_i}\right) = 0,2031e^{1,8063\frac{R_0}{R_i}} \quad (3.4)$$

где  $A_0$  – регистрируемая амплитуда;  $A_i$  – искомая амплитуда колебаний,  $R_0$  – расстояние до измерительных прибором,  $R_i$  – расстояние до точки прогноза.

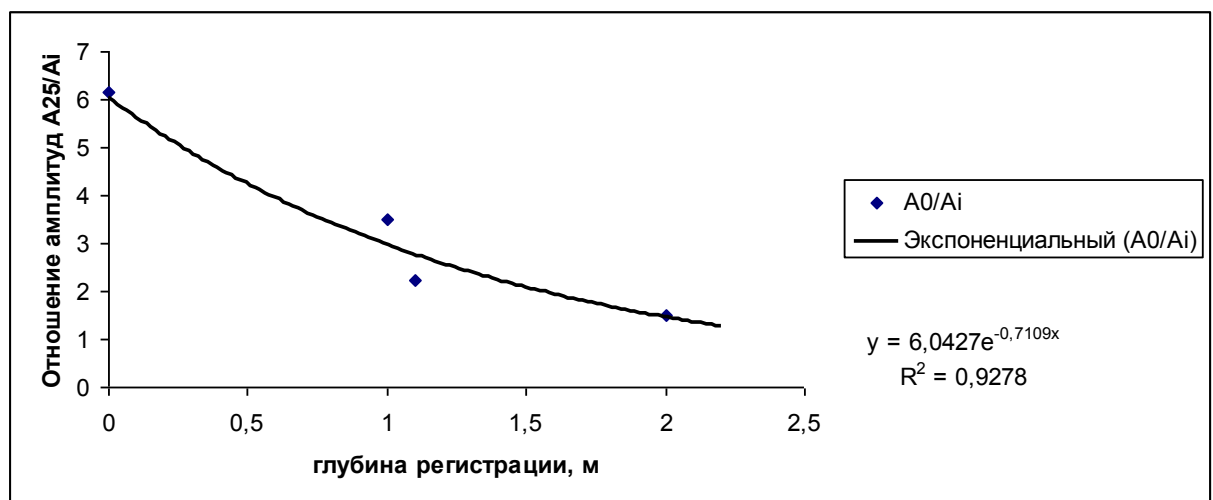


Рисунок 3.19 – Интенсивность затухания амплитудных значений от глубины



$$\frac{A_0}{A_i} = f(H) = 6e^{-0,7H} \quad (3.5)$$

где  $A_0$  – регистрируемая амплитуда;  $A_i$  – искомая амплитуда колебаний,  $H$  – глубина регистрации сигнала.

Проведя численный анализ данных из рисунка 3.18., можно с уверенностью сказать, что полученная выше зависимость описывает затухания на различных расстояниях.

Таким образом, можно сделать вывод о снижении амплитудных значений колебания грунта в 3 раза с увеличением глубины регистрации на 2 метра. Это наблюдение позволит точнее оценивать воздействие сейсмозрывных волн на газопровод, даже имея лишь данные, полученные на поверхности при мониторинге массовых взрывов.

Вышеизложенное позволяет предположить, что замеренные параметры сейсмозрывных волн в процессе мониторинга непосредственно у действующего газопровода будут некорректными, не отражающими истинные их значения на стенке трубы. Поэтому, по нашему мнению, измерения при мониторинге параметров сейсмозрывных волн необходимо проводить на расстоянии не ближе, чем 5 метров от оси действующего газопровода в сторону взрыва.

Основываясь на значениях пиковой скорости смещения, полученных в ходе мониторинга, предельно допустимую скорость смещения грунта необходимо принять равной 20 см/с, рассчитанную по методике, в основу, которой положен предел прочности трубы на растяжение. Поэтому скорость смещения, регистрируемая на поверхности, не должна превышать 40 см/с, исходя из того, что соотношение между измеряемой поверхностной скоростью смещения и скоростью смещения грунта, в месте заложения трубы охраняемого газопровода следует принять равным 2.

### **3.6. Выводы по главе 3**

Дополнительно для уточнения и апробации результатов модельного эксперимента был проведен промышленный эксперимент в реальных условиях при реконструкции газопровода. Были измерены параметры СВВ на

разном расстоянии от места взрыва. Одновременно с этим измерялись параметры СВВ на поверхности, на глубине 1 и на глубине 2 метра.

Таким образом, были получены данные о затухании колебаний грунта с расстоянием и определены поправочные коэффициенты для определения параметров СВВ на глубинах 1 и 2 метра по измеренным значениям этих параметров, полученных на поверхности.

Анализ результатов сейсмозрывного воздействия на подземный газопровод позволяют сделать выводы:

1. Для фиксирования амплитудных значений скорости колебаний СВВ рекомендовано устанавливать датчики на расстояние 5м от оси газопровода, в сторону взрываемого блока. Такой выбор места установки измерительной аппаратуры объясняется повышенной трещиноватостью, в следствие применения БВР, структуры скального массива вдоль действующего газопровода.

2. Фиксируемые значения ускорения колебаний грунта на поверхности в три-четыре раза выше, относительно получаемых ускорений подземным магистральным газопроводом.

3. Коэффициенты сейсмичности и затухания должны определяться экспериментально для каждого объекта, исходя из данных опытных взрывов по предложенной методике.

Проведенный с использованием данной методики сейсмомониторинг массовых взрывов при ведении ВР на границе опасной зоны от подземных газопроводов гарантирует соблюдение условий, обеспечивающих безопасность таких объектов, от сейсмического воздействия взрыва.

Основным результатом настоящих исследований следует считать вывод линейной зависимости амплитудных значений ускорения смещения массива горных пород от глубины регистрации сигнала. Эта зависимость позволяет, зная значение скорости смещения массива горных пород полученные при мониторинге на поверхности, прогнозировать параметры сейсмозрывных волн на глубине залегания действующего газопровода.

Вторым важным результатом является полученное отношение зависимостей изменения амплитудных значений сейсмозрывных волн от расстояния до источника взрыва, и получение наглядного коэффициента разницы амплитудных значений на глубине в два метра от регистрируемых колебаний на поверхности.

## ГЛАВА 4. ОЦЕНКА НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЕ ПРОТЯЖЕННОСТИ ВЗРЫВАЕМОГО БЛОКА НА ОХРАНЯЕМЫЙ ОБЪЕКТ

### 4.1. Расчетная оценка сейсмического воздействия на газопровод

Ведение взрывных работ по прокладке дополнительной ветки газопровода, как оговаривалось не однократно выше, влечет за собой ряд решений сложных инженерных задач. Зачастую, дополнительная ветка прокладывается в непосредственной близости от уже действующей магистрали на расстоянии от 5 до 30 метров. Взрываемые блоки при этом на данный момент не имеют ограничений по длине, описанных в нормативных документах, и выбираются только лишь, из расчета работоспособности оборудования и трудозатрат, таким образом, чтобы обеспечить оптимальную скорость проходки траншей. На примере газопровода СЕГ можно отметить, что длина взрываемых блоков была в среднем больше расстояния до протяженного охраняемого объекта в полтора и более раза, а максимально значение доходило до пяти расстояний.

Согласно федеральным нормам и правилам [58] взрывные работы ведутся с применением короткозамедленного взрывания, основной задачей которого является не допущение, интерференции сейсмозрывных волн от разных групп зарядов.

Для этих целей интервал замедления при КЗВ подбирается, таким образом, чтобы время существования положительной фазы сейсмозрывной волны не превышало значений выбранной степени замедления (4.1) [76]:

$$t_{нол} = K_t \cdot l g R, c \quad (4.1)$$

где  $K_t$  – коэффициент, зависящий от крепости пород, изменяется в диапазоне от 0,01 до 0,03.

Таблица 4.1 – Время существования положительной фазы, с [76]

Расстояние, м.	5	10	15	20	40	80	120
k=0,01	0,016094	0,023026	0,027081	0,029957	0,036889	0,04382	0,047875
k=0,02	0,032189	0,046052	0,054161	0,059915	0,073778	0,087641	0,09575
k=0,03	0,048283	0,069078	0,081242	0,089872	0,110666	0,131461	0,143625

Представленная таблица отражает: при достаточной крепости пород положительная фаза сейсмозрывной волны сохраняется на протяжении 143 мс.

Основным критерием оценки сейсмического действия взрыва, как и говорилось ранее, считается максимально допустимая скорость смещения грунта, описываемая формулой М.А. Садовского (4.2):

$$v = K_c \cdot \left( \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-n} \quad (4.2)$$

где  $v$  – допустимая скорость смещения горных пород в основании охраняемого объекта, см/с;  $Q$  – масса одновременно взрываемого заряда ВВ, кг;  $R$  – расстояние от охраняемого объекта до места взрыва, м;  $n$  – коэффициент затухания сейсмозрывных волн;  $K_c$  – коэффициент условий взрывания (сейсмичности).

Допустимая скорость смещения при оценке воздействия сейсмозрывной волны на стенки газопровода считается связанной с напряжениями, возникающими на стенках металлических труб. Либо с удельной энергией волны пропорциональной толщине стенки газопровода [126].

Массу заряда считают, как эмпирическую зависимость расстояния от газопровода до ближайшего заряда  $R$  (в м) и разницу между сопротивлением стенки и приведенным напряжением от фактического рабочего давления.

Массу заряда, которую допустимо взрывать вблизи действующих газопроводов при взрывании мерзлых грунтов, находящихся в удовлетворительном состоянии, рекомендуется определять по формуле (4.3) [42]:

$$Q = 0,0025R^3 \quad (4.3)$$

где  $R$  – расстояние от газопровода до ближайшего заряда.

Данный методы расчета допустимой массы не учитывают короткозамедленное взрывание, и как применение КЗВ влияет, на интенсивность сейсмического воздействия. Более полно влияние КЗВ и

схемы взрывания приведены в работе [109]. В ней отражена разница сейсмического воздействия от трех разных схем инициирования с различными степенями замедления, с регистрацией сигналов на разных расстояниях результаты измерений приведены на рисунке 4.1. На рисунке 4.1 а отражена схема с центральным инициированием с применением НСИ с интервалом замедления в 25 мс в ряду и 42 мс между рядами, на рисунке 4.1 б и 4.1 в отражена порядная схема взрывания, при которой магистраль расположена ближе к открытой поверхности, отличия заключаются в применении разных интервалов замедления, для 4.1 б это 42 мс в ряду и 67 мс между рядами; для 4.1 в 67 мс в ряду и 109 между рядами. Результатами проведенных исследований стало закономерное снижение, как общего числа взрывааемых скважин, приходящихся на положительную фазу существования СВВ, так и соответственно снижение самих параметров СВВ. Однако данные исследования проводились на карьерах при взрывании больших рядов. Траншеи обычно проходят, применяя не более четырех скважинных зарядов в ряду и малым расстоянием между скважинами. Такие условия не позволяют нам применять максимальные ступени замедления, повышающие вероятность подбоя взрывной сети. Также в данной работе, как и во многих других, измерительная аппаратура устанавливалась на значительном удалении от взрыва.

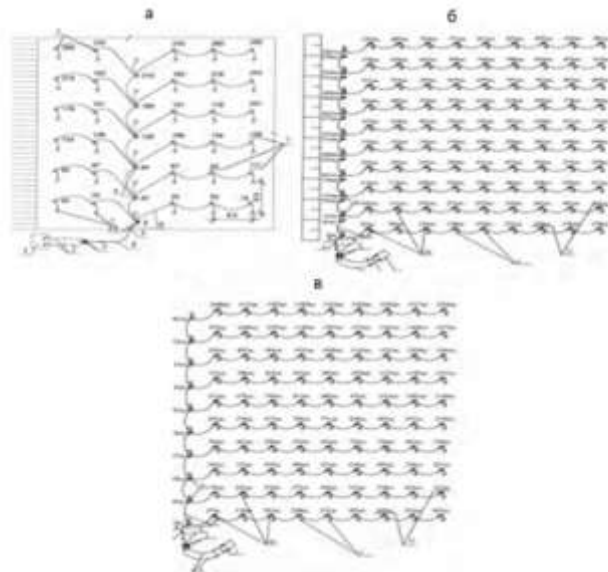


Рисунок 4.1 – Экспериментальные схемы взрывания [76]

## 4.2. Изучение влияния протяженности взрываемого блока на параметры сейсмозрывной волны

Для решения задач, связанных с более полным изучением параметров сейсмозрывной волны, на базе реализации проекта строительства Североевропейского газопровода. Участок «Ленинград-Выборг-Госграница 1» от 134.0 до 158.0 км в Портовом ЛПУМГ, Выборгском районе, Ленинградской области» проводился сейсмомониторинг.

Результаты, взрывов экспериментальных взрывов, описанных в предыдущей главе, закономерно предсказали увеличение скорости колебаний с уменьшением расстояния до охраняемого объекта. Однако, интервал времени за который на сейсмостанция регистрировала колебания не как от этого расстояния не зависел и равняется приблизительно 45 - 46 миллисекундам. В ходе мониторинга было зафиксировано 30 взрывов на блоках различной протяженности, ниже описан метод оценки сейсмических колебаний вблизи действующего газопровода.

Взрываемый блок измерялся фактически, затем полученное значение делилось на 2 и по результатам на равноудаленных расстояниях выставлялось три сейсморегистратора. Для измерений использовались сейсмостанции (сейсмографы) Zet 048-C, BlastmateIII и Minimateplus. Поверхностные датчики - высокочастотный 3-х компонентный InstanTel (Канада) – 3 штуки.

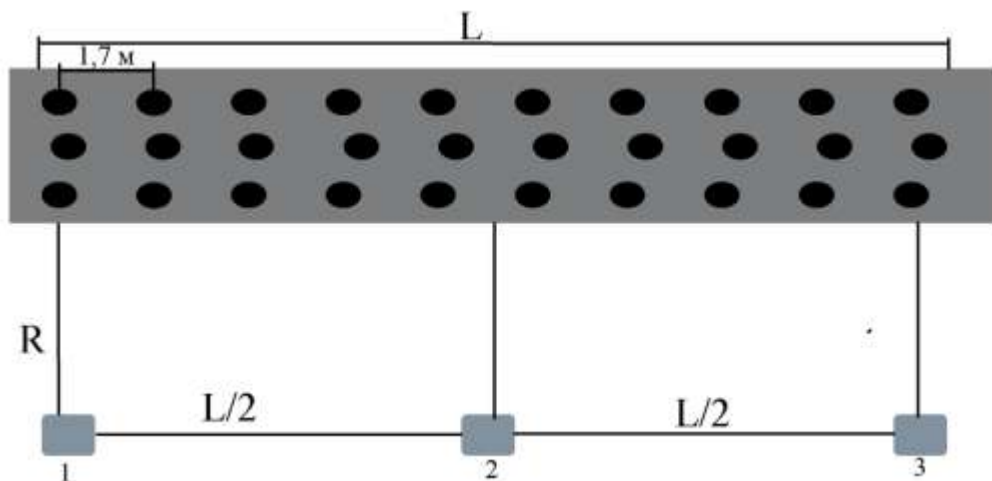


Рисунок 4.2 – Схема установки датчиков при сейсмическом мониторинге



Рисунок 4.3 – Пример установки датчиков



Рисунок 4.4 – Взрываемый блок

Наглядные результаты, полученные от различных взрывов, сведены в таблицу 4.2

Таблица 4.2 – Сводные данные по блокам различной протяженности

№	Наименование показателя	ед. изм.	Значение		
1	Сетка скважин	м	1,8x1,5		
2	Кол-во ВВ на скважину	кг	1,75		
3	Тип ВВ		Нитронит П-60, ПАС-60		
4	Способ инициирования		НСИ		
5	Интервалы замедления	мс	42		
6	Метод уменьшения разлета кусков горной породы		Взрывание с применением укрытия (песок)		
7	Количество взрывных скважин	шт	45	73	99
8	Длина взрываемого блока	м	27	44	60
8	Расстояние до места взрыва	м	26		
9	Максимальное кол-во ВВ в ступени замедления	кг	5,25	5	5



## Продолжение таблицы 4.2

№	Наименование показателя	ед. изм.	Значение		
10	Максимальное значение скорости смещения грунта (модуль суммы векторов по всем направляющим)	мм/с	<b>37,03</b>	<b>41,50</b>	<b>44.98</b>
11	Рекомендуемое максимальное значение скорости смещения грунта	мм/с	157		

Из полученных данных видно, что при удлинении блока регистрируемая скорость на одинаковых расстояниях и с одинаковыми массами взрывааемых зарядов, при неизменной точке инициирования и постоянных ступенях замедления - увеличивается. Для проверки вероятного усиления влияния интерференции волн при изменении различных параметров БВР, таких как масса заряда ( $Q$ ), число скважин ( $N$ ) и протяженность блока ( $l$ ). Было принято решение о необходимости более полного анализа сейсмограмм.

Исходя из параметров блока, а также полученных в ходе экспериментальных взрывов коэффициентов сейсмичности ( $K=542$ ) и коэффициентов затухания ( $n=2,2$ ), мною была построена модельная велосигграмма суммарного вектора скорости, основанная на максимальной массе заряда в свежине на рассматриваемом блоке (рисунки 4.5 и 4.6). На рисунках показана зависимость амплитудных значений суммарного вектора скорости от времени, где синим цветом обозначены реальные данные, а оранжевым предельны допустимые скорости смещения рассчитанные по формуле М.А. Садовского 4.2.

Рисунки 4.5, 4.6 и 4.7 отражают лишь незначительные отклонения реальной амплитуды от расчетных параметров. На рисунке 4.6 отклонение составляет 16%, хотя это наложение все рано не превысило максимальных значений PPV в 31 мм/с. Данную сходимость расчетных и экспериментальных значений СВВ можно наблюдать и на других блоках малой протяженности. Однако совсем другую картину можно наблюдать на блоках протяженностью в два и более раза превышающую расстояние до

охраняемого объекта, примеры велосиграмм приведены на рисунках 4.9, 4.10 и 4.11.



Рисунок 4.5 – Зависимость скорости от времени, взрыв №1

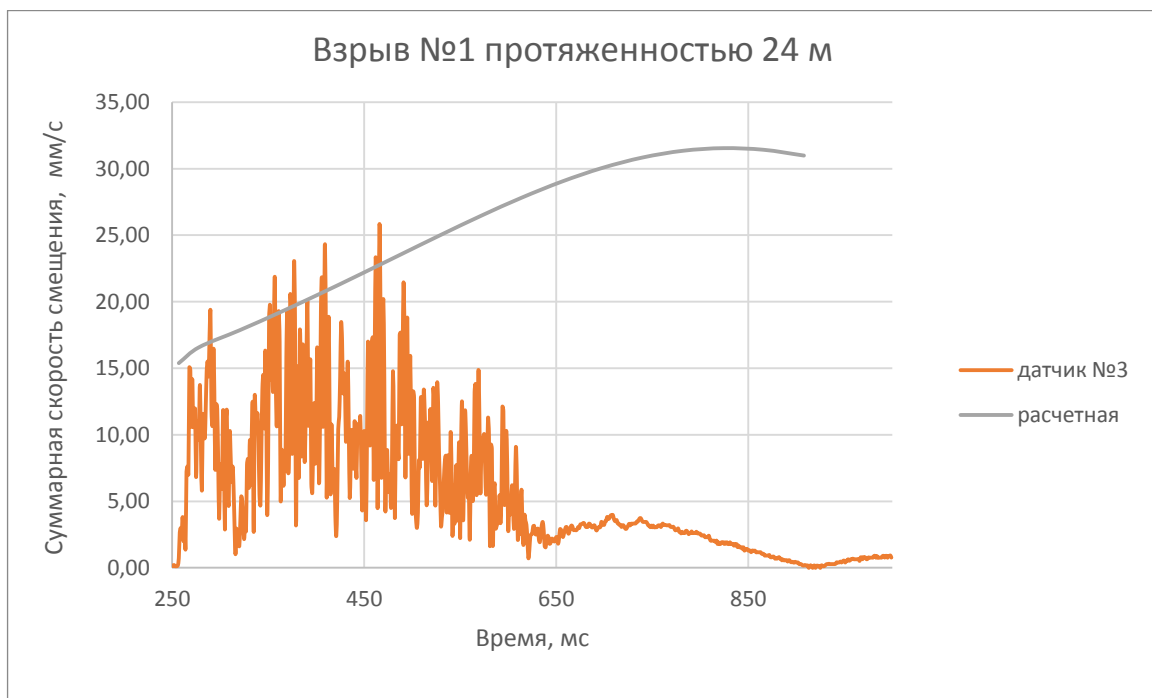


Рисунок 4.6 – Зависимость скорости от времени, взрыв №1



Рисунок 4.7 – Зависимость скорости от времени, взрыв №2

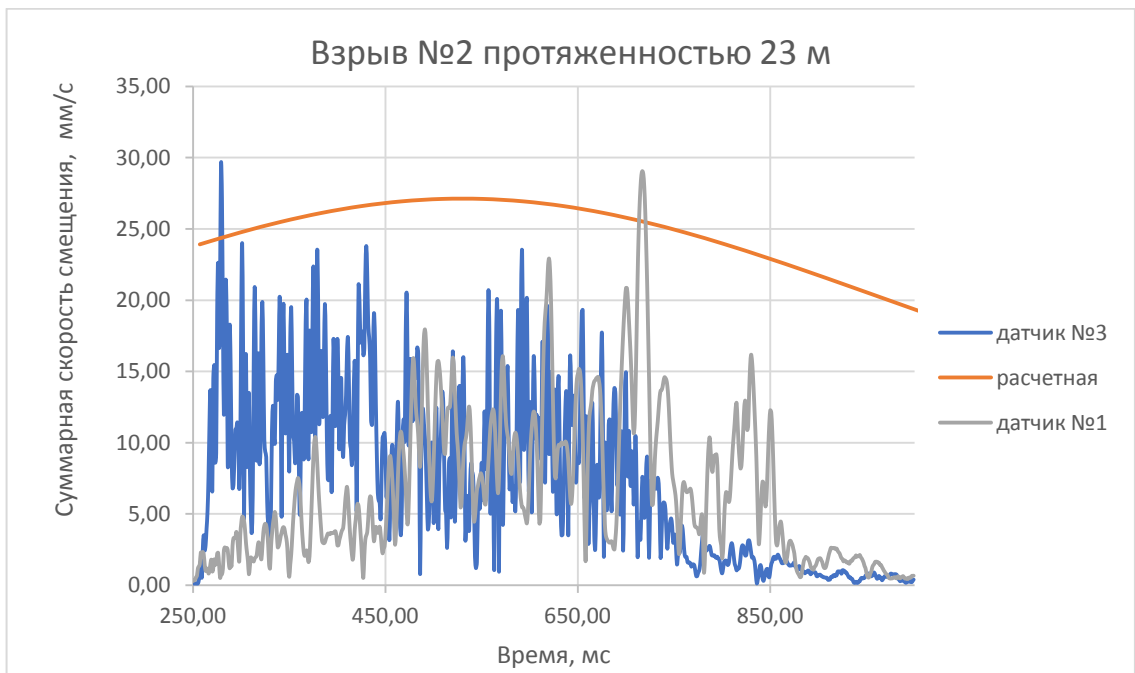


Рисунок 4.8 – Зависимость скорости от времени, взрыв № 2



Рисунок 4.9 – Зависимость скорости от времени, взрыв №3



Рисунок 4.10 – Зависимость скорости от времени, взрыв №7



Рисунок 4.11– Зависимость скорости от времени, взрыв №10

Значения, полученные на протяженных блоках, значительно превышают расчетные. Это может свидетельствовать о вступлении в действие сейсмических колебаний, не связанных со взрывом, возможно в сейсмическую трассу подключаются остаточные колебания самого массива, также влияние может оказывать угол отклонения суммарной векторной скорости.

Разница между превышающими пиками, составляет приблизительно 400 мс. Для уменьшения *PPV* при использовании короткозамедленного взрывания со ступенями замедления в 42 мс, рекомендовано использовать группу зарядов с большим временем замедлением расположенную каждый 11 ряд. Учитывая сетку скважин, 11 рядов, будет составлять протяженность в 17 м, таким образом можно предположить, что проходка траншеи буровзрывным способом, должна осуществляться с разделением взрываемого блока на сектора, длина такого сектора не должна превышать расстояния до охраняемого объекта. Тогда теоретически возникающие сейсмические эффекты перестанут влиять на сейсмические колебания, рисунок 4.11.



Рисунок 4.12 – Модельная зависимость скорости от времени, при применении увеличенных интервалов замедления

Однако, вероятно не только время замедления играет роль при наложении сейсмических волн. Другим не мало важным фактором может является угол отклонения начального вектора точки наблюдения в момент прихода в точку наблюдения импульса от последующей ступени замедления.

#### 4.3. Выводы по главе 4

Было отмечено, что при взрывании протяженных блоков в геологических условиях проведения БВР, превышение реальных значений скорости смещения над расчетными происходило приблизительно каждые 400мс. Для уменьшения PPV при использовании короткозамедленного взрывания со ступенями замедления в 42 мс, рекомендовано использовать группу зарядов с большим временем замедлением расположенную каждый 11 ряд. Учитывая используемую сетку скважин, 11 рядов, будет составлять протяженность в 17 м, таким образом можно предположить, что проходка траншеи буровзрывным способом, должна осуществляется с разделением взрываемого блока на сектора, длина такого сектора не должна превышать расстояния до охраняемого объекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – прогнозирования сейсмического воздействия при производстве взрывных работ на границе опасной зоны действующего газопровода.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Показано, что при производстве массовых взрывов в скальных грунтах при сооружении траншеи под прокладку газопровода преобладающая частота колебаний составляет 15-40 Гц.

2. Эмпирически получена зависимость частоты спектрального максимума от величины массы ВВ в ступени замедления. Показано, что с увеличением массы одновременного взрываемого заряда частота, соответствующая максимуму амплитуды, уменьшается  $f = -0.39 \lg(m) + 114$ .

3. Основным результатом настоящих исследований следует считать вывод линейной зависимости глубины регистрации сигнала и амплитудных значений ускорения смещения массива горных пород. Эта зависимость позволяет, зная значение скорости смещения массива горных пород получение при мониторинге на поверхности, прогнозировать параметры сейсмозрывных волн при изменении [1-2 метра] глубины залегания действующего газопровода.

$$\frac{A_0}{A_H} = f(H) = 6e^{-0,7H}$$

4. При взрывании удлиненных блоков, проходка траншеи буровзрывным способом, должна осуществляться с разделением взрываемого блока на сектора, длина такого сектора не должна превышать расстояние до охраняемого объекта.

5. При взрывании удлиненных блоков с использованием применяемой схемы инициирования, необходимо учитывать фактор увеличения пиковой

скорости колебаний. Для более точной оценки предложено использовать дополнительный коэффициент, учитывающий протяжённость взрываемого блока. Коэффициент соответствующей протяженности блока (при относительном расстоянии  $R_{отн} = 2, K=1,3; R_{отн} = 3, K=1,5; R_{отн} = 5, K=1,7$ ).

б. Результаты диссертации в дальнейшем могут быть использованы для исследования безопасности действующих газопроводов от действия взрывов протяженных блоков. При увеличении протяженности блока углы наклона векторной скорости, приходящие в точку регистрации, значительно изменяются относительно блоков с коротким расстоянием. Дальнейшее изучение этого явления может привести к улучшению расчета сейсмической безопасности охраняемого газопровода при введении поправочного коэффициента.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авдеев, Ф.А. Нормативный справочник по буровзрывным работам / Ф.А. Авдеев, В.Л. Барон, Н.В. Гуров, В.Х. Кантор // М.: Недра, 1986, 511 с.
2. Адушкин, В.В. Геомеханика крупных взрывов // М.: Наука, 1993.
3. Адушкин, В.В. Особенности деформирования блочной среды при взрыве. / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // ФТПРПИ, №2, 1990.
4. Адушкин, В.В. О воздействии сейсмических колебаний малой амплитуды на инженерные сооружения / В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян, В.Н. Родионов // ДАН том 369 №6. 1999 С. 816-817.
5. Башкуев, Э.Б. Проектирование взрывных работ в промышленности / Э.Б. Башкуев, А.М. Бейсебаев, В.Ф. Богацкий и др. // М.: Недра, 1983.
6. Богацкий, В.Ф. Сейсмическая безопасность при взрывных работах / В.Ф. Богацкий, В.Х. Пергамент // М.: Недра, 1990.
7. Богацкий, В.Ф. Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов / В. Ф. Богацкий, А. Г. Фридман // М.: Недра, 1982. 162 С.
8. Ванягин, И.Ф. Техника и технология взрывных работ / И. Ф. Ванягин, В. А. Боровиков // Л.: 1985.
9. Виноградов, Ю.И. Методические принципы измерения кусковатости горной массы / **С.Т. Соколов**, С.В. Хохлов, А.В. Баженова // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле 2020, том 1. С. 112-123.
10. Виноградова, Е. Ю. Оценка сейсмического воздействия взрывных работ на действующие тоннели при их реконструкции / диссертация кандидата технических наук: 25.00.20 Санкт-Петербург, 2009. 148 с.
11. Виноградова, Е.Ю. Классификация негативных последствий буровзрывной технологии на окружающую среду при проходке тоннелей // Записки Горного института. СПб.: СПГИ, 2006, Том 170, часть 1. С. 91–94.

12. Господариков, А.П. Математическое моделирование воздействия сейсмозрывных волн на горный массив, включающий выработку / А.П. Господариков, Я.Н. Выходцев, М.А. Зацепин // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 405-411. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.405.

13. Гриб, Г.В. Зависимость сейсмического действия взрыва в массиве горных пород от технологических условий ведения буровзрывных работ / Г.В. Гриб, А.Ю. Пазынич, Н.Н. Гриб, Е.Е. Петров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 14, №1(8), 2012. С.12-17

14. Гурин, А.А. Управление ударными воздушными волнами при взрывных работах. // М.: Недра, 1978.

15. Егизбаев, М.К. Сейсмическое воздействие взрыва на инженерные сооружения и массив горных пород / М.К. Егизбаев, В.Л. Выходцев, В.А. Артемов, Е.Ю. Виноградова, С.В. Щербич // Записки Горного Института. Том 171. С. 185.

16. Жариков И.Ф. Разработка и научное обоснование энергосберегающих технологий взрывных работ на открытых разработках угольных месторождений // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук // М., 2001, 329 с.

17. Зельдович, Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер // М.: Наука, 1970.

18. Ищенко, Б.С. Экранирование волн напряжений от действия взрыва заряда взрывчатого вещества слоем закладочного материала / Б.С. Ищенко, А.К. Ищенко, К.С. Ищенко // Сучасні ресурси енерго зберігачи технології гірничного виробництва, випуск 2 (16) – 2015. – С. 19-31.

19. Казаков Н.Н. Взрывная отбойка руд скважинными зарядами. // М.: Недра, 1975. – 191с

20. Камянский, В.Н. Оценка сейсмозрывных нагрузок на законтурный массив при разделке отрезной щели. // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. №7. С. 181-188.

21. Костюченко, В.Н. Статистика повреждений зданий при взрывных работах и вопросы сейсмической безопасности // Физ.-техн. пробл. разраб. полез.ископаемых. 1985. №1. С. 67-73.

22. Котиков, Д.А. Установление связи между распределением сейсмособытий в массиве горных пород и его тектоническим строением / Д.А. Котиков, А.Н. Шабаров, С.В. Цирель // Горный журнал. 2020. Том 1, С.28-32. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05

23. Кочарян, Г.Г. Влияние геодинамических факторов на механическую устойчивость протяженных инженерных сооружений / Г.Г. Кочарян, В. Н. Родионов, А. Л. Бенедик и др. // Геоэкология, №6, 2001, С. 489-500.

24. Кочарян, Г.Г. Исследование деформационных свойств и проницаемости зон нарушений сплошности скальных массивов / Г.Г. Кочарян, Л.Д. Лившиц, Д.В. Павлов, Л.М. Перник // Геоэкология, 2001, № 1.

25. Кочарян Г.Г. Создание геомеханических моделей геофизических объектов/ Г.Г. Кочарян, А.А. Бенедик, В.Н. Костюченко, А.М. Кулюкин, Д.В. Павлов // Физические процессы в геосферах при сильных возмущениях. М.: ИДГ РАН, 1996.

26. Кузьменко, А.А. Сейсмическое действие взрыва в горных породах / А.А. Кузьменко, В.Д. Воробьев, И.И. Денисюк, А.А. Дауэтак // М.: Недра, 1990. – 172 с.

27. Кутузов, Б.Н. Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности: Учебное пособие // М.: из-во Горная книга, Изд-во МГГУ, 2009. 670 с.

28. Кутузов, Б.Н. Безопасность взрывных работ в промышленности // М.: Недра, 1992.

29. Мазур, И.И. Безопасность газопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов // М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004, 104с.
30. Маляров, И.П. Оптимизация параметров буровзрывных работ на гранитных карьерах при разрушении крупноблочных пород / И.П. Маляров, А.В. Минченков, В.К. Угольников // Комплексное использование минерального сырья. 1985. №7. С.3-6
31. Маташ, С.Л. Обеспечение безопасности действующих газопроводов, при строительстве вблизи траншей в скальных грунтах буровзрывным способом для новых магистралей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. ТОМ 12, С. 186-193.
32. Машуков, И.В. Расчет безопасных расстояний по сейсмическому воздействию массовых взрывов для зданий и сооружений с учетом схемы взрывания скважинных зарядов / И. В. Машуков, В. П. Доманов, А. Г. Серг, Д.А. Егоров // Вестник. Научно-технический журнал, 2013, №1, С. 16-22.
33. Методика оценки остаточного ресурса элементов газопроводной обвязки компрессорных станций // Москва, ВНИИГАЗ, 2001. 53 с.
34. Мосинец, В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах // М.: Недра, 1976, 271 с.
35. Мосинец, В.Н. Исследование особенностей сейсмического действия взрывов на карьере со сложными горно-геологическими условиями / В. Н. Мосинец, Э.А. Григорьянц, А.И. Тетерин // ФТПРПИ, №3, Новосибирск, 1977, С. 33-43.
36. Мосинец, В.Н. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. / В.Н. Мосинец, А.В. Абрамов // М.: Недра, 1982.
37. Мухаметшип А.М. Методическое руководство по оценке сейсмического действия взрывов на карьерах КМА / А.М. Мухаметшип, М.В. Яковлев, Б.Б. Кузьменко, И.Б. Кузьменко / НИИКМА Центргипроруда, Губкин, 1984, 87с.
38. Огородников, Ю.Н. Буровзрывные работы при строительстве выработок большого сечения // Л.: ЛГИ, 1980.

39. Орехов, В.В. Некоторые аспекты изучения применения траншейных барьеров для уменьшения энергии поверхностных волн в грунте / В.В. Орехов, Х. Негахдар. // Вестник МГСУ. 2013. №3. С. 98-112.

40. Разрушение взрывом и необратимые деформации горных пород / Под ред. Е. И. Шемякина. // М.: ННЦГП - ИГД им. А. А. Скочинского, 1997.

41. Райс, М. Сжатие твердых тел сильными ударными волнами. Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях // М.: Мир, 1965.

42. Рекомендации по технологии производства взрывных работ в мерзлых и скальных грунтах при сооружении магистральных трубопроводов параллельно действующим стальным подземным трубопроводам Р 442-81 // Издание ВНИИСТа Редактор Л. С. Панкратьева

43. Рубцов, С.К. Сравнительный анализ применения неэлектрических систем инициирования на горнодобывающих предприятиях / С.К. Рубцов, В.П. Ершов, Е.Ю. Сидоров // Горный вестник Узбекистана, 2005, № 2, С. 61–65.

44. Садовский, М.А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований. // В кн.: Физика взрыва, №1, М.: АН СССР, 1952, С. 20 – 109.

45. Садовский, М.А. От сейсмологии к геомеханике. О модели геофизической среды /М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко, В.Н. Родионов // Вестник АН СССР, 1983, №1.

46. Садовский, М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности при взрывах. // М.: Изд. ИГД АН СССР, 1946.

47. Садовский, М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. // М.: Наука, 2004, 439 с.

48. Садовский, М.А. Оценка сейсмически опасных зон при взрывах // Труды Сейсмологического института АН СССР, 1974, ТОМ 25, №25. С. 11.

49. Садовский, М.А. Сейсмический эффект взрывов // М.: Гостоптехиздат, 1939, С.12.

50. Сейсмика промышленных взрывов. Сб. «Взрывное дело» №85/42. М.: Недра, 1983.

51. **Соколов, С.Т.** Анализ современных методов управления энергией взрыва / **С.Т. Соколов**, С.В. Хохлов, Ю.И. Виноградов // Сб. ст. по материалам XVIII международной научно-практической конференции «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке» Новосибирск: ИЗД АНС «СибАК», 2018.

52. Ставрогин А.Н. Механика деформирования и разрушения горных пород / А.Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня //– М.: Недра, 1992.

53. Сысоев, А.А. Анализ систем инициирования скважинных зарядов на карьерах // Известия вузов. Горный журнал. 2016, №4, С. 60-67.

54. Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве. // Утверждены Минтопэнерго России 07.05.1997АО "Институт "Гидропроект", 1997 г.

55. Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности // М., Недра, 1972 г.

56. Трубецкой, К.Н. Современные проблемы разрушения массивов горных пород /К.Н. Трубецкой, С.Д. Викторов // М.: ИПКОН РАН, 1998.

57. Фадеев, А.Б. Дробящее и сейсмическое действие взрывов на карьерах. // М.: Недра, 1972, 133 с.

58. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Правила безопасности при взрывных работах. Сборник документов. Серия 13. Выпуск 14. - М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». 2014. - 332 с.

59. Физика взрыва. / под ред. К.П. Станюковича Изд. 2-ое. // М.: Наука, 1975.

60. Ханукаев, А.Н. Физические процессы при отбивании горных пород взрывом. // М.: Недра, 1974.

61. Ханукаев, А.Н. Энергия волн напряжения при разрушении горных пород взрывом. // Госгортехиздат, 1962.

62. Харкевич, А.А. Спектры и анализ // М.: ГИТТЛ, 1952
63. Хохлов, С.В. Особенности сейсмического мониторинга при ведении взрывных работ вблизи действующего газопровода /С. В. Хохлов, **С.Т. Соколов**, Ю. И. Виноградов // Известия Тульского государственного университета. 2019(1), стр. 296-305.
64. Хохлов, С.В. Проведение промышленных взрывов вблизи газопровода / С.В. Хохлов, **С.Т. Соколов**, Ю.И. Виноградов, И. Б. Френкель// Записки Горного института. Том 247. С. 48-56. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.
65. Цейтлин, Я.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. /Я. И. Цейтлин, Н. И. Смолий. // М.: Недра, 1981.
66. Черниговский, А. А. Применение направленного взрыва в горном деле и строительстве. // М.: Недра, 1976.
67. Шемяки, Е.И. О поведении горных пород при динамических нагрузениях. // ФТПРПИ, №1. Новосибирск, 1966, С. 12-20.
68. Штейнберг, В.В. Колебания грунта при землетрясениях. Источники и воздействие разрушительных сейсмических колебаний. // Вопросы инженерной сейсмологии. вып.31 // М.: Наука, 1980, С. 47-67,
69. Яковлев Ю.С. Основы гидродинамики взрыва. // Л.: ВМАКВ им. А.Н. Крылова, 1958.
70. Abbaszadeh Shahri A. Optimized developed artificial neural network-based models to predict the blast-induced ground vibration/ A. Abbaszadeh Shahri, R. Asheghi // Innovative Infrastructure Solutions. 2018. Vol. 3(34) P. DOI: 10.1007/s41062-018-0137-4
71. Adam, M. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches /M. Adam, O. Estorff // Computers and Structures. 2005. Vol. 83(1). P. 11-24. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.08.010.
72. Adhikari, G.R. Control measures for ground vibration induced by blasting at coal mines and assessment of damage to surface structures / G.R. Adhikari, N.K. Jain, S. Roy // Journal of Rock Mechanics and Tunneling Technology. 2006. Vol. 12(1). P. 3-19.

73. Alzawi, A.El. Experimental investigations on vibration isolation using open and GeoFoam wave barriers: comparative study / A.El. Alzawi, M.H. Naggar // In: Proceedings of the 63rd Canadian geotechnical conference. Calgary, AB, Canada. 2010. P. 360-368.

74. Amnieh, H.B. Application of simulated annealing for optimization of blasting costs due to air overpressure constraints in open-pit mines / H.B. Amnieh, M.H. Bidgoli, H. Mokhtari, A. Bazzazi // Journal of Mining and Environment. 2019. Vol. 10(4). P. 903-916. DOI: 10.22044/jme.2019.8084.1675.

75. Azimi, Y. Prediction of Seismic Wave Intensity Generated by Bench Blasting Using Intelligence Committee Machines // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2019. Vol. 32(4). P. 617-627. DOI: 10.5829/ije.2019.32.04a.21.

76. Chernysheva, N.V. Combined Method of 3d Analysis for Underground Structures in View of Surrounding Infinite / N.V. Chernysheva, G.S. Kolosova, L.A. Rozin // Homogeneous and Inhomogeneous Medium. Mag. Civ. Eng. 2016, 62, 83–91, doi:10.5862/MCE.62.8.

77. Daubechies, I. The wavelet transforms, time // frequency location and signal analysis. IEEE Trans. Inf. Theory 1990, 36, 961–1005.

78. Dojcar, O. Investigation of Blasting Parameters to Optimize Fragmentation // Trans. Instu. Min. Metall. (Sec. A: Mining Industry). – 1991, p. 100.

79. Duvall, W.I. Reviews of Criteria for Estimation Damage to Residences from Blasting Vibrations / W.I. Duvall, D.E. Fogelson // US Bur. Mines, R15968;

80. Eelevli, B. Evaluation of parameters affected on the blast induced ground vibration (BIGV) by using relation diagram method (RDM) / B. Eelevli, E. Arpaz // Acta Montanistica Slovaca. 2010. C232 Rocnik 15. cislo 4. P. 261-268.

81. Erarslan K. Barrier holes and trench application to reduce blast induced vibration in Seyitomer coal mine. /K. Erarslan, Ö. Uysal, E. Arpaz,



M.A. Cebi // Environmental Geology. 2008. Vol. 54(6). P. 1325-1331. DOI: 10.1007/s00254-007-0915-3.

82. Erdik, M. Assessment of seismic risk in Tashkent /M. Erdik, T. Rashidov, E Safak, A. Turdukulov // Uzbekistan and Bishkek Kyrgyz Republic. Soil Dyn. Earthq. Eng. 2005, 25, 473–486, // doi:10.1016/j.soildyn.2004.11.002.

83. Feng, W. Large-scale field trial to explore landslide and pipeline interaction / W. Feng, R. Huang, J. Liu, X. Xu, M. Luo // Soils Found. 2015, 55, 1466–1473, doi:10.1016/j.sandf.2015.10.011.

84. Georgievskii, D.V. Seismodynamics of extended underground structures and soils: Statement of the problem and self-similar solutions. / D.V. Georgievskii, M. S. Israilov // Mech. Solids. 2015, 50, 473–484, doi:10.3103/S0025654415040135.

85. Grishchenkova, E.N. Development of a Neural Network for Earth Surface Deformation Pre-diction // Geotechnical and Geological Engineering. 2018. Vol. 36(4). P. 1953-1957. DOI: 10.1007/s10706-017-0438-y

86. H. Kumao, Fragmentation of rock through blasting and shock wave theory of blasting. // Quarterly of the Colorado School of Mines, v. 51, N3. – 1956.

87. Heath, D.J. Blast Vibration and Environmental Loads Acting on Residential Structures: State-of-The-Art Review / D.J. Heath, E.F. Gad, J.L. Wilson // Journal of Performance of Constructed Facili-ties. 2016. Vol. 30(2). // DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000750

88. Hudaverdi, T. An alternative approach to predict human response to blast induced ground vibration / T. Hudaverdi, O. Akyildiz // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2021. Vol. 20. P. 257-273. // DOI: 10.1007/s11803-021-2018-7

89. Isheyskiy, V. Combination of fracturing areas after blasting column charges during destruction of rocks /V. Isheyskiy, M. Marinin, V. Dolzhikov // International Journal of Engineering Research and Technology. 2019. Vol. 12(12). P. 2953 – 2956.

90. Ismoilova, S.I. Force properties of longitudinal interaction of the underground pipeline with soil / S.I. Ismoilova, P.V. Loginov, S.S. Khamidov, N.A. Akbarov, J.X. Kumakov // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020, 869, 052036 // doi:10.1088/1757-899X/869/5/052036.

91. Israilov, M.S. A new approach to solve the problems of seismic vibrations for periodically nonuniform buried pipelines // Moscow Univ. Mech. Bull. 2016, 71, 23–26, // doi: 10.3103/S0027133016010052.

92. Israilov, M.S. Coupled seismic vibrations of a pipeline in an infinite elastic medium. Mech. Solids. 2016, 51, 46–53 // doi: 10.3103/S0025654416010052.

93. Jung, J.K. Multi-directional force–displacement response of underground pipe in sand / J.K. Jung, T.D. O'Rourke, C. Argyrou // Can. Geotech. J. 2016, 53, 1763–1781, doi:10.1139/cgj-2016-0059.

94. Kahrman, A. Analysis of parameters of ground vibration produced from bench blasting at a limestone quarry // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2004. Vol. 24(11). P. 887-892. DOI: 10.1016/j.soildyn.2004.06.018.

95. Karadogan, A.A New Damage Criteria Norm for Blast-Induced /A. Karadogan, A. Kahrman, U. Ozer // Ground Vibrations in Turkey. Arab J. Geosci. 2013, 7, 1617–1626.

96. Khandalwal, M. Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: A neural network approach / M. Khandalwal, T.N. Singh // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 289(4–5). P. 711-725. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.02.044

97. Khandalwal, M. Blast-induced ground vibration prediction using support vector machine // Engineering with Computers. 2011. Vol. 27. P. 193-200 DOI: 10.1007/s00366-010-0190-x

98. Khandalwal, M. Evaluation and prediction of blast induced ground vibration using support vector machine / M. Khandalwal, P.K. Kankar, S.P. Harsha // Mining Science and Technology. 2010. Vol. 20(1). P.64-70. DOI: 10.1016/S1674-5264(09)60162

99. Khandelwal, M. Evaluation of Blast-Induces Vibration Predictors /M. Khandelwal, T.H. Singh // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2007. P. 116-125. DOI: 10.1016/j.soildyn.2006.06.004
100. Kholodilov, A.N. Modeling Seismic Vibrations under Massive Blasting in Underground Mines / A.N. Kholodilov, A.P. Gospodarikov // Journal of Mining Science. 2020. Vol. 56(1). P. 29-35. DOI: 10.1134/S1062739120016454.
101. Kholodilov, A.N., Modeling Seismic Vibrations under / A.N. Kholodilov, A. P. Gospodarikov // Massive Blasting in Underground Mines. J. Min. Sci.2020, 56, 29–35.
102. Khudoyberdiev, F.T. The process of destruction of rock by an explosion with the use of blast hole stemming in road heading mining operation / F.T. Khudoyberdiev, Y.T. Nurboboev, S.F. Maksudov S.M. Shomurodov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol.614. P. DOI: 10.1088/1755-1315/614/1/012067.
103. Khusanov, B.E. Thickness dimensions of the contact layer of soil-rigid body interaction / B.E. Khusanov, B.B. Rikhsieva// E3S Web Conf. 2019, 97, 04040, doi:10.1051/e3sconf/20199704040.
104. Kiehl, J.R. Measurement and analyses of blasting vibrations /J.R. Kiehl, J. Werfling // In Proceedings of the 10th ISRM Congress, 8-12 September, Sandton, South Africa. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. 2003. P. 635-640
105. Kim, D.S. Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations / D.S. Kim, J.S. Lee // Soil dynamics and earthquake engineering, Vol. 19, 2000, P. 115-126.
106. Kim, H.S. Nonlinear dynamics, delay times and embedding windows / H. S. Kim, R. Eykholt, J.D. Salas //Phys. D Nonlinear Phenom. 1999.
107. Konya, C.J. Surface Blast Design. / C.J Konya, E.J. Walter // Prentice Hall –New Jersey, 1990, p. 100-101, 266.

108. Korichi, T. Design of a model blasting system to measure peak p-wave stress /T. Korichi, B. Bachir // *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2003, 23, P. 513–519.

109. Koteleva, N. Digital Processing of Seismic Data from Open-Pit Mining Blasts / N. Koteleva, I. Frenkel // *Appl. Sci.* 2021. Vol.11. P. 383. [https://doi.org/ 10.3390/app11010383](https://doi.org/10.3390/app11010383).

110. Kotikov, D.A. Dependence of the distribution of seismic events on the location of geological faults /D.A. Kotikov, S.V. Tsirel // *In Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development. Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM, Foz Do Igvasu, Brazil, September 13-18. 2019. 2020. P. 1448-1455.*

111. Kotikov, D.A. Connecting seismic event distribution and tectonic structure of rock mass /D.A. Kotikov, A.N. Shabarov, S.V. Tsirel // *Gorn. Zhurnal* 2020, 1, 28–32.

112. Kuzu, C. The importance of site-specific characters in prediction models for blast-induced ground vibrations // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* 2008. Vol. 28(5). P. 405-414. DOI: 10.1016/j.soildyn.2007.06.013.

113. Lalin, V.V. New Results in Dynamics Stability Problems of Elastic Rods. / V.V. Lalin, D.A. Kushova // *Appl. Mech. Mater.* 2014, 617, 181–186, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.617.181.

114. Leng, Z. Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes in open-pit mine /Z. Leng, Y. Fan, Q. Gao, Y. Hu // *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2020, 30, 373–380.

115. Li, X. Spectra, energy, and fractal characteristics of blast waves / X. Li, Z. Li, E. Wang, Y. Liang, Y. Niu, Q. Li // *J. Geophys. Eng.* 2018, 15.

116. Lighthill, M.J. *An Introduction to Fourier Analysis and Generalized Functions* // Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1958.

117. Litvinenko, V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // *Nat. Resour. Res.* 2019, 29.

118. Manoj, R. Prediction of fly rock in open pit blasting operation using machine learning method / R. Manoj, M. Monjezi // *Int. J. Min. Sci. Min. Inst.* 2018, 234, 612–623.

119. Manolis, G.D. Dynamic response of buried pipelines in randomly structured soil /G.D. Manolis, G. Stefanou, A.A. Markou, // *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2020, 128, 105873, doi:10.1016/j.soildyn.2019.105873.

120. Marinin M.A. Modeling of the welding process of flat sheet parts by an explosion / M.A. Marinin, S.V. Khokhlov, V.A. Isheyskiy // *J. Min. Inst.* 2019, 237, 275–280.

121. Mirsaidov, M.M. An assessment of stress-strain state of earth dams with account of elasticplastic, moist properties of soil and large strains. / M. M. Mirsaidov, T. Z. Sultanov, S. A. Sadullaev // *Mag. Civ. Eng.* 2013, 40, 59–68, doi:10.5862/MCE.40.7.

122. Mukherjee, S. Wavelet-based characterization of design ground motions /S. Mukherjee, V. K. Gupta // *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 2002, 31.

123. Muravyeva, L. Application of the Risk Theory to Management Reliability of the Pipeline / L. Muravyeva, N. Vatin, N. // *Appl. Mech. Mater.* 2014, 635–637, 434–438, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.635–637.434.

124. Muravyeva, L. Risk Assessment for a Main Pipeline under Severe Soil Conditions on Exposure to Seismic Forces. / L. Muravyeva, N. Vatin, N. // *Appl. Mech.Mater.* 2014, P. 635–637.

125. Muravyeva, L. The Safety Estimation of the Marine Pipeline/ L. Muravyeva, N. Vatin, // *Appl. Mech. Mater.* 2014, 633–634, 958–964, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.633–634.958.

126. Murzahanov, K. Experience and practical results of marmorized limestone reserves re-evaluation / K. Murzahanov, S Khokhlov, Y. Vinogradov, **S. Sokolov** // *Test Engineering and Management*, VOL 82: JAN/FEB 2020 P.3248-3252.

127. Nicholls, H.R. *Blasting Vibrations and Their Effects on Structures* / H.R. Nicholls, C.F. Johnson, W.I. Duwall // Bulletin 656; US Bur. Mines: Denver, CO, USA, 1971.

128. Nikraves, S.M.Y. *Intelligent Fault Diagnosis of Bearings Based on Energy Levels in of ground vibration due to quarry blasting based on gene expression programming: A new model for peak particle velocity* /S.M.Y. Nikraves, H. Rezaie, M. Kilpatrik, H. Taheri. // *Open-Pit Mines Using EANNs Model. Appl. Sci.* 2019, 9, 4554. *ore mines. Int. J. Min. Sci. Technol.* 2015, 25, 59–66.

129. O'Rourke, T.D. *Earthquake Response of Underground Pipeline Networks in Christchurch* / T.D. O'Rourke, S.S. Jeon, S. Toprak, M. Cubrinovski, M. Hughes, S. Van Ballegooy, D. Bouziou, N. Zeal // *Earthq. Spectra* 2014, 30, 183–204, doi: 10.1193/030413EQS062M.

130. Okamoto, S. *Introduction to Earthquake Engineering* // University of Tokyo: Tokyo, Japan, 1973; 571 p. ISBN 978-0470653074.

131. Prakash, A.J. *Analysis of blast vibration characteristics across a trench and a pre-split plane* /A. J. Ptakash, P. Palroy, D.D. Misra // *Fragblast.* 2004. Vol. 8(1). P. 51-60. DOI: 10.1080/13855140512331389634.

132. Roy, M.P. *Influence of initiation mode of explosives in opencast blasting on ground vibration* / M.P. Roy, P.K. Singh, G. Singh, M. Monjezi // *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology.* 2007. Vol. 116(1). P. 1-6. DOI: 10.1179/174328607X161888

133. Silva, J. *Practical assessment of rock damage due to blasting* / J. Silva, T. Worsey, B. Lusk // *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2019, 29, 379–385.

134. Singh, B. *Blasting in Ground Excavations and Mines* /B. Singh, P.P. Roy, R.B. Singh, A. Bagchi, M.M. Singh// Balkema: Rotterdam, The Netherlands, 1993; p. 188.

135. Singh, P.K. *Evolution of effective charge weight per delay for prediction of ground vibrations generated from blasting in a limestone mine* / P.K. Singh, A. Sirveiya, K. Babu, M.P. Roy, C. Singh // *International Journal of*

Surface Mining. Reclamation and Environment. 2006. Vol. 20(1). P. 4-19.  
DOI:10.1080/13895260500286050

136. Singh, T.N. An Intelligent Approach to Prediction and Control Ground vibrations in mines /T.N. Singh, V. Singh // Geotechnical and Geological Engineering. 2004. Vol. 23. P. 249-262. DOI: 10.1007/s10706-004-7068-x.

137. Sultanov, K.S. Laws of Shear Interaction at Contact Surfaces between Solid Bodies and Soil / K.S. Sultanov, A.A. Bakhodirov // Soil Mech. Found. Eng. 2016, 53, 71–77, doi:10.1007/s11204-016-9367-7.

138. Sultanov, K.S. Wave Theory of Seismic Resistance of Underground Pipelines / K. Sultanov N. I. Vatin //Applied Sciences. 11. 1797. 2021. 10.3390/app11041797.

139. Toprak, S. Prediction of earthquake damage to urban water distribution systems: a case study for Denizli / S. Toprak, F. Taskin, A. C. Koc //, Turkey. Bull. Eng. Geol. Environ. 2009, 68, 499–510, doi:10.1007/s10064-009-0230-1.

140. Torano, J. FEM models including randomness and its application to the blasting vibrations prediction / J. Torano, R. Rodriguez, L. Diego, J.M. Rivas, M.D. Casai // Computers and Geotechnics. 2006. Vol. 33(1). P. 15-28. DOI: 10.1016/j.compgeo.2006.01.003.

141. Torano, J. Simulation of the vibrations produced during the rock excavation by different methods /J. Torano, R. Rodriguez // WIT Transactions on Modelling and Simulation. 2003. Vol. 33. P. 343-349.

142. Uysal, K.E. Barrier holes and trench application to reduce blast induced vibration in Seyitomer coal mine / K.E. Uysal, Ö.E. Arpaz, M.A. Cebi // Environ Geo. 2008. Vol. 54. P. 1325–1331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-007-09153>.

143. Uysal, K. E. Effect of artificial discontinuities on blast induced vibrations in open pit mines / K.E. Uysal, Ö.E Arpaz, M. Cavus, S. Beyhan, Y. Tola, S. Yuvka // In Harmonizing Rock Engineering and the Environment.

Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. 2012. P. 1281-1284. DOI: 10.1201/b11646-240.

144. Uysal, O. Environmentally sensitive drilling and blasting design for a surface mining /O. Uysal, B. Eleveli, H. Akcakoca // In Mine Planning and Equipment. Proceedings of the 13th International Sym. o Mine Planning and Equipment Selection, 1-3 Sept. 2004, Polland, A.A. Balkema. 2004. P. 329- 331.

145. Vasilets, V.V. Safe operation of mining-and-transport system under impact of seismic shot waves /V.V. Vasilets, P.I. Afanasev, A.A. Pavlovich // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2020. Vol. 1. P. 26-35. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-26-35.

146. Wijewickreme, D. Soil restraints on buried pipelines subjected to reverse-fault displacement / D. Wijewickreme, M. Monroy, D.G. Honegger, D.J. Nyman // Can. Geotech. J. 2017, 54, 1472–1481, doi: 10.1139/cgj-2016-0564.

147. Yamaguchi, T. Study on the propagation of blast-induced ground vibrations and its control measure in open pit mine / T. Yamaguchi, T. Sasaoka, H. Shimada, A. Hamanaka, K. Matsui, S. Wahyudi, H. Tanaka, S. Kubota// Mine planning and Equipment selection, 2014. – P. 979-986.

148. Yastrebova, K.N. Influence of the nature of the outflow of explosion products from blast holes and boreholes on the efficiency of rock destruction / K.N. Yastrebova, V.I. Chernobay, D.V. Moldovan // E3S Web of Conferences. 2020. P. 174 DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.

149. Yastrebova, K.N. Solving the issue of ventilating atmosphere of opencast mining by resloping bench face / K.N. Yastrebova, V.I. Chernobay, D.V. Moldovan // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29(1). P. 1–6.

150. Younesian, D. Performance analysis of multiple trenches in train-induced wave mitigation / D. Younesian, M. Sardi // Journal of low frequency noise, vibration and active control, Vol. 33 (1), 2014. – P. 47-64.



**СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА*****РИСУНКИ***

Рисунок 1.1 – Влияние БВР на окружающую среду

Рисунок 1.2 – Баланс энергии взрыва (по М.А. Садовскому и А.Ф. Беляеву) [11]

Рисунок 1.3 – Схематические зависимости напряжения сдвига  $\tau(u)$ , возникающего на поверхности контакта газопровода с грунтом, от относительного смещения  $u$  при различных нормальных напряжениях [138]

Рисунок 2.1 – Схема расположения действующих и проектируемых линий газопровода [84]

Рисунок 2.2 – Схема монтажа взрывной сети на участке строительства СЕГ

Рисунок 2.3 – Сейсмостанция Blastmate III

Рисунок 2.4 – Сейсмостанция MinimatePlus

Рисунок 2.5 – Пример регистрируемой сейсмограммы

Рисунок 2.6 – Спектр частотных характеристик, полученный при использовании быстрого преобразования Фурье

Рисунок 2.7 – Спектр амплитуды скорости смещения от частоты

Рисунок 2.8 – Диаграмма распределения количества спектральных максимумов по частотам

Рисунок 2.9 – Зависимость частоты, на которой зарегистрирован максимум амплитуды, от общей протяженности взрываемого блока

Рисунок 2.10 – Зависимость частоты, на которой зарегистрирован максимум амплитуды от массы одновременно взрываемого заряда

Рисунок 2.11 – Зависимость максимальной величины скорости колебаний грунта от частоты

Рисунок 3.1 – Расположение газопровода и зарядов, вертикальный срез [12]

Рисунок 3.2 – Конструкция скважинного заряда рыхления

Рисунок 3.3 – Типы сейсмических волн

Рисунок 3.4 – Зоны изменения характера волны [35, 36]

Рисунок 3.5 – Схема однокомпонентного пьезо-датчика (акселерометра) 1 – сердечник стальной; 2 – ударопрочный корпус; 3 – пьезоэлектрические пластичны; 4 – инерционная масса [10]

Рисунок 3.6 – Внешний вид датчика

Рисунок 3.7 – Фотография лабораторной установки, на которой проводилась тарировка акселерометров

Рисунок 3.8 – Внешний вид BRUEL & KJAER 8340

Рисунок 3.9 – Схема регистрации сейсмического сигнала

Рисунок 3.10 – Схема проведения экспериментального исследования [64]

Рисунок 3.11 – Схема установки углубленных датчиков [64]

Рисунок 3.12 – Процесс подготовки эксперимента [64]

Рисунок 3.13 – Фотография установки пьезо-датчика в измерительную скважину [64]

Рисунок 3.14 – Акселерограмма ускорения, экспериментальный взрыв №1

Рисунок 3.15 – Графическое отражение экспериментальных данных

Рисунок 3.16 – Данные измерений ускорений на различных глубинах: а-2 метра; б – 1 метр; в – поверхность

Рисунок 3.17 – Зависимость амплитуды от глубины

Рисунок 3.18 – Интенсивность затухания амплитудных значений от приведенного расстояния

Рисунок 3.19 – Интенсивность затухания амплитудных значений от глубины

Рисунок 4.1 – Экспериментальные схемы взрывания [76]

Рисунок 4.2 – Схема установки датчиков при сейсмическом мониторинге

Рисунок 4.3 – Пример установки датчиков

Рисунок 4.4 – Взрывааемый блок

Рисунок 4.5 – Зависимость скорости от времени, взрыв №1

Рисунок 4.6 – Зависимость скорости от времени, взрыв №1

Рисунок 4.7 – Зависимость скорости от времени, взрыв №2

Рисунок 4.8 – Зависимость скорости от времени, взрыв № 2

Рисунок 4.9 – Зависимость скорости от времени, взрыв №3

Рисунок 4.10 – Зависимость скорости от времени, взрыв №7

Рисунок 4.11 – Зависимость скорости от времени, взрыв №10

Рисунок 4.12 – Модельная зависимость скорости от времени, при применении увеличенных интервалов замедления

### ***ТАБЛИЦЫ***

Таблица 1.1 – Негативные последствия применения БВР

Таблица 1.2 – Уравнения расчета PPV [64]

Таблица 1.3 – Параметры, влияющие на PPV [80]

Таблица 1.4 – Доля вклада каждого параметра в ПСКЧ (пиковая скорость колебания частиц) вблизи очага по данным диаграммы отношений параметров БВР [80]

Таблица 1.5 – Доля вклада каждого параметра в ПСКЧ в точке наблюдения по данным диаграммы отношений параметров БВР [80]

Таблица 1.6 – Рекомендуемые допустимые скорости колебаний сооружений разных классов для горных пород [10]

Таблица 2.1 – Параметры БВР

Таблица 2.2 – Данные, полученные при проведении мониторинга

Таблица 3.1 – Параметры зарядов рыхления

Таблица 3.2 – Технические характеристики ударного стенда [10]

Таблица 3.3 – Основные характеристики BRUEL & KJAER 8340 [10]

Таблица 3.5 – результаты измерений [64]

Таблица 4.1 – Время существования положительной фазы, с [76]

Таблица 4.2 – Сводные данные по блокам различной протяженности