

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Хохлов Сергей Владимирович

Официальные оппоненты:

Закалинский Владимир Матвеевич

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, отдел проблем геомеханики и разрушения горных пород (отдел № 5), ведущий научный сотрудник;

Трофимов Андрей Викторович

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», центр физико-механических исследований горных пород и материалов, заведующий центром.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

Защита диссертации состоится 29 сентября 2021 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ИВАНОВ
Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и степень разработанности темы исследования. Газотранспортная система Российской Федерации с каждым годом неуклонно развивается. Так за последнее десятилетие по данным ФГС и Росстата экспорт газа увеличился с 177 миллиардов тонн в год в 2010 году, до 221 миллиарда тонн в 2019 году. Для увеличения пропускной способности действующих газопроводов прокладываются дублирующие ветки на расстояниях от 15 до 50 метров. В местах, где магистраль газопровода прокладывается в скальных грунтах единственным экономически выгодным способом, обеспечивающим необходимые темпы строительства является применение буровзрывных работ (БВР). 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 воздействие на охраняемый объект. Поэтому необходимо проводить постоянный мониторинг сейсмического действия взрыва для каждого участка БВР.

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

Многими авторами использовались аналитические соотношения, основанные на принятии плоского фронта и постоянной амплитуды сейсмозрывной волны (СВВ), либо на эмпирически полученных зависимостях. В последнее время набирает популярность 3-D 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 равной 50 мм/с, для пиковой скорости. Однако считается, что стальная труба – прочная конструкция по сравнению со зданием, а также существует инерционный эффект рассеивания СВВ за счет грунта подложки трубопровода, 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 требованиям. Таким образом, единственным надежным способом оценки сейсмического действия взрыва можно считать проведение прямых натурных измерений.

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

Основные задачи исследований:

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.

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.

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.

Личный вклад автора 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 бурозрывных 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 и объем 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении работы представлена информация об актуальности исследований, обозначены задачи и цель, приведена идея работы, сформулированы защищаемые положения, практическая значимость и научная новизна.

В первой главе описаны негативные факторы, возникающие при ведении взрывных работ вблизи охраняемых объектов, описан процесс возникновения и распространения СВВ. Рассмотрена оценка сейсмостойкости действующих газопроводов. Представлены методы снижения сейсмического воздействия. Проведена постановка задач исследования.

Во второй главе приведен анализ результатов, полученных при мониторинге буровзрывных работ на участке строительства Северо-Европейского газопровода. Основное внимание уделено анализу частотных характеристик сейсмозрывной волны.

В третьей главе отражены горно-геологические условия при проведении экспериментальных исследований. Детально описан эксперимент по определению зависимостей между амплитудными значениями, ускорения колебаний грунта в сейсмозрывной волне регистрируемыми на поверхности и на различной глубине.

В четвертой главе рассматривается влияние удлиненного взрываемого блока на действующий газопровод. Создание расчетной модели, сравнение натуральных измерений скорости СВВ с расчетными значениями. На основе сходимости модели и натуральных экспериментов, даны рекомендации по прогнозированию сейсмического эффекта.

В заключении приведены основные результаты и выводы, полученные при проведении исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Частоты максимумов скорости смещения колебаний грунта в сейсмозрывной волне, являются функцией массы одновременно взрываемого заряда: с увеличением массы заряда частота максимума уменьшается.

При проведении взрывных работ в стесненных условиях, а к таким можно отнести проходку траншеи под укладку газопроводов вблизи действующей ветки, необходимо прогнозирование СВВ. На практике для определения параметров СВВ необходимо решение нескольких задач, которые бывают прямыми: к ним относятся определение сейсмических характеристик взрывной волны (амплитуда, скорость) с целью оценки воздействия на охраняемые объекты (оценка возможных повреждений), и обратные задачи, такие как подбор параметров взрыва, для достижения определенного значения амплитуды в обозначенной точке. Прогнозирование сейсмического сигнала от действия взрыва достаточно сложный процесс, так как трудно определить параметры взрыва и свойства пород, влияющие на характер распространения сейсмозврывной волны. Эти величины очень часто считаются возмущениями, так как их влияние изменчиво и иногда непредсказуемо.

На данном этапе существует несколько подходов к прогнозированию параметров СВВ. Одним из наиболее распространенных является моделирование, которое включает в себя несколько методов. Самым распространенным и простым считается эмпирический подбор уравнения, связывающего различные целевые параметры (свойства горных пород, масса взрываемых зарядов, глубина скважины и др.) и различные факторы. Процесс определения этой зависимости разнообразен и варьируется от поиска уравнения в процессе статистической обработки данных до использования строго формальных формул, к которым подставляются искомые коэффициенты. Примером такой формулы является подход М.А. Садовского, формула (1):

$$V = K_c \cdot \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-n} \quad (1)$$

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

Другой, более современный подход заключается в использовании ЕСМ (Error Correction Model), фокусируется на применении прогнозных моделей, основанных на искусственных нейронных сетях (ИНС). С одной стороны такой подход более точный, легко настраиваемый и предсказуемый. Такие модели учитывают факторы и взаимосвязи, влияние которых может быть упущено в эмпирическом подходе. Модели, основанные на ИНС, имеют значительный недостаток, прогнозирование только через определенный промежуток времени. В то время как ИНС обучается, получая необходимые для прогноза данные, объект исследования остается неуправляемым, без какой-либо возможности получить данные модели.

Особенно актуальны модели, основанные на эмпирических данных, но такие модели справедливы только для определенного горизонта прогноза. Обычно горизонт прогноза определяется строго той областью, где были найдены коэффициенты эмпирического уравнения. В связи с этим актуальной задачей является поиск математических методов, позволяющих найти эмпирические коэффициенты уравнений, применимые к прогнозу взрывных процессов, и расширить горизонт прогноза за короткий промежуток времени без потери точности.

Настоящие исследования были проведены с целью получения зависимостей СВВ проходящей в скальных грунтах от различных параметров БВР.

В процессе мониторинга параметров сеймовзрывной волны на подземный газопровод «Nord Stream» были проведены 50 массовых взрывов. Расстояние до охраняемого объекта варьировалось от 15 до 28 метров. Для регистрации параметров колебаний применялся трехосевой сейсмоприемник Minimate Plus (Instantel), предварительно прошедший поверку. Отобранные для анализа 20 массовых взрывов обладали следующими параметрами БВР: диаметр скважинных зарядов составлял 76, глубина скважины - 3 м. Интервал замедления на магистрали равный 67 мс между скважинами в ряду 42 мс. В каждой ступени одновременно взрывалось по 2 заряда. Сетка скважин оставалась неизменной и составляла согласно паспортам 1,8 на 1,7 метра. Траншея

прокладывалась в скальных грунтах, сложенных в основном гранитами и гранитогнейсами с коэффициентом крепости по проф. Протодьяконову 16. При проведении взрывных работ применялось патронированное эмульсионное взрывчатое вещество Нитронит П – 60, ПАС – 60. Подрыв зарядов осуществлялся неэлектрической системой инициирования «ИСКРА П».

По набору данных, полученных в ходе БВР, проведён анализ значений частоты, соответствующих максимальной частоте колебаний, который показал, что в проведенных замерах 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.

Частота колебаний грунта является важным параметром при определении влияния сейсмозрывных волн на здания и доказано в случае, если частота колебаний грунта при взрыве совпадёт с собственной (резонансной) частотой сооружения, находящегося в непосредственной близости от места проведения взрывных работ, то вероятность нарушения охраняемого объекта значительно увеличивается.

Рассмотрев зависимость частоты, соответствующей максимумам амплитуды скорости смещения, от количества скважинных зарядов во взрываемом блоке, и от массы ВВ на ступень замедления. Используя быстрое преобразование Фурье, получен спектр сейсмического сигнала, для отдельного массового взрыва. Оценивая связь частотных характеристик СВВ от массы заряда, было получено следующее наблюдение при увеличении массы заряда, все три компоненты скорости смещения уменьшаются (рисунок 1).

Для анализа зависимостей, приведённых на рисунке 1, была использована логарифмическая аппроксимация. Описывая данные зависимости, можно отметить, что с увеличением массы единовременно 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.

Зависимость частоты спектрального максимума от массы ВВ в ступени замедления (для настоящих условий ведения БВР) можно описать уравнением (2):

$$f = -0.39 \lg(m) + 114 \quad (2)$$

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

2. Амплитудные значения ускорения колебаний точки регистрации под действием сейсмозрывной волны в зависимости от глубины, их регистрации, определяются показаниями поверхностных датчиков по зависимости вида $A_H = A_0 e^{-0,7H}$.

Отсутствие возможности устанавливать сейсмические датчики непосредственно на углубленном охраняемом объекте, приводит нас к необходимости косвенной оценки сейсмического воздействия на охраняемый объект. Результаты аналогичных исследований добавляют к формуле М.А. Садовского (1) два поправочных коэффициента: α_1 — коэффициент, учитывающий число открытых поверхностей (при двух таких поверхностях вблизи заряда $\alpha_1 = 1$, при одной $\alpha_1 = 1,5$); α_2 — коэффициент, учитывающий положение рассматриваемой точки массива относительно поверхности ($\alpha_2 = 1$ на поверхности, на глубине в 2–3 м. $\alpha_2 = 0,5$), формула (3):

$$V = \frac{K_c \alpha_1 \alpha_2 \sqrt[3]{Q^2}}{R^2} \quad (3)$$

где Q – масса одновременно взрывающегося заряда, кг; R – расстояние до рассматриваемой точки, м; K_c – коэффициент сейсмичности, учитывающий горно-геологическое строение массива горных пород и масштаб; варьируется в широких пределах.

Данные коэффициенты были получены условий железорудных карьеров и не могут в полной мере отразить характер затухания СВВ в геологических условиях Ленинградской области. В связи, с чем возникает необходимость в проведении экспериментального исследования по определению эмпирической зависимости изменения амплитуды колебаний, регистрируемых на

поверхности относительно амплитудных значений, приходящих на подземный газопровод.

Для проведения экспериментальных исследований было организовано 5 взрывов одиночных зарядов ВВ массой 1 кг. Расстояние от места взрыва до нахождения измерительной аппаратуры составляло от 13 до 25 метров. Датчики устанавливались на оси параллельно модельному трубопроводу, один поверхностный трёхкомпонентный геофон фирмы Instanetel с сейсмографом Minimate Plus, и четыре углубленных однокомпонентных пьезо-датчика, подключенных к осциллографу Tetronix. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 2.

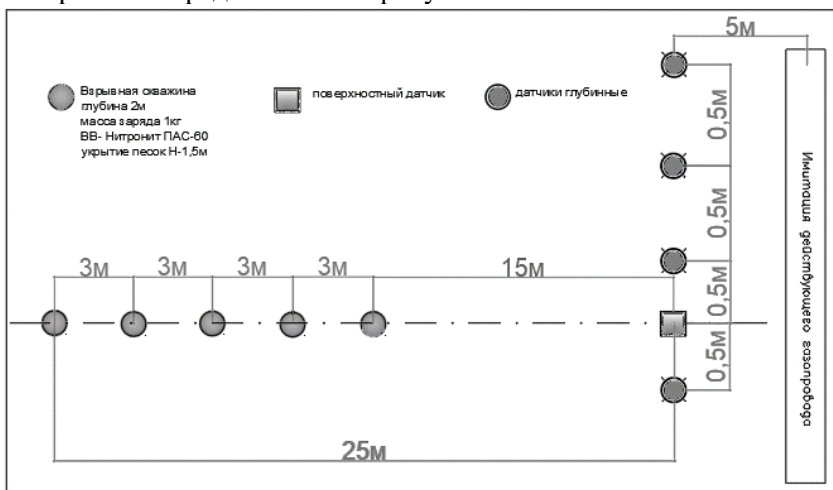


Рисунок 2 – Схема проведения экспериментального исследования

В ходе экспериментальных исследований производилась регистрация горизонтальной составляющей ускорения смещения массива пород на различных глубинах и расстояниях от взрыва. Исследования проводились непосредственно перед началом производства буровзрывных работ в геологических условиях, отвечающих месту проходки траншеи под магистральный газопровод, и включали в себя:

- проведение инструментальных исследований с целью выбора и обоснования оптимальной массы заряда, исходя из изменения амплитуды сейсмических колебаний с увеличением глубины регистрации сигнала;

- уточнение расчетных аналитических зависимостей по определению закона затухания параметров сейсмозрывных волн с расстоянием от места взрыва для проектной массы взрываемого заряда;

- уточнение численных параметров коэффициента сейсмичности и коэффициента затухания сейсмозрывных волн.

Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментального исследования распределения горизонтальных ускорений колебаний частиц массива с увеличением глубины регистрации

№ датчика	Глубина, м	Расстояние, м				
		25	22	19	16	13
Значение ускорения, g						
1	2,2	0,12	0,18	0,27	0,42	0,74
2	2	0,13	0,2	0,28	0,47	0,8
3	1,1	0,22	0,33	0,48	0,76	1,32
4	1	0,26	0,39	0,58	0,91	1,6
5	0	0,31	0,56	0,82	1,3	2,27

На рисунке 3 наглядно видно возрастание амплитудных колебаний с уменьшением расстояния до точки регистрации, а также более плавное изменение этих значений с увеличением расстояния. Это можно объяснить переходом сейсмической волны из ближней в среднюю сейсмическую зону, что влечёт за собой изменение условий распространения сейсмических волн. На рисунке 4 отражена значительная разница в углах наклона аппроксимирующих линий, что свидетельствует о разной интенсивности затухания амплитудных значений на различных расстояниях. Скорее всего на близких расстояниях улавливаемая продольная волна усиливается быстро затухающей поверхностной волной (или волной Релея). С

увеличением расстояния влияние волн Релея становится незначительным, или вовсе пропадает.

Рисунок 5 отражает зависимость изменения амплитудных значений горизонтальной составляющей ускорения скорости смещения СВВ от приведенного расстояния.

С помощью полученной зависимости можно спрогнозировать амплитудные значения СВВ при изменении расстояния до охраняемого объекта, формула (4):

$$A_i = A_0 e^{1,7 \frac{R_0}{R_i}} \quad (4)$$

где A_0 – регистрируемая амплитуда; A_i – искомая амплитуда колебаний, R_0 – расстояние до измерительных прибором, R_i – расстояние до точки прогноза. Данная зависимость подтверждает полученные экспериментальным путем: коэффициент сейсмичности и коэффициент затухания $K=542$, $n=2,2$.

Проведя численный анализ данных из рисунка 6, можно с уверенностью сказать, что полученная зависимость (5) описывает затухание амплитудных значений ускорения СВВ с изменением глубины регистрации относительно поверхности.

$$A_H = A_{\text{пов}} e^{-0,7H} \quad (5)$$

где $A_{\text{пов}}$ – регистрируемая амплитуда на поверхности; A_H – амплитуда колебаний на глубине, H – глубина регистрации.

Таким образом, можно сделать вывод о снижении амплитудных значений колебаний грунта в 3-4 раза, с увеличением глубины регистрации на 2 метра. Это наблюдение позволит точнее оценивать воздействие сейсмозрывных волн на газопровод, даже имея лишь данные, полученные с поверхности при мониторинге массовых взрывов.

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 $R_{\text{отн}} = 2$, $K=1,3$; $R_{\text{отн}} = 3$, $K=1,5$; $R_{\text{отн}} = 5$, $K=1,7$).

Проводя дальнейший анализ результатов эксперимента и данных, полученных при мониторинге, было уделено внимание влиянию протяженности взрываемого блока на характеристики сейсмозрывной волны.

При проведении мониторинга поверхностные датчики устанавливались в трех местах (напротив точки инициирования устанавливался датчик №1, по центру взрываемого блока датчик №2 и напротив крайней скважины взрываемого блока датчик №3). Для отобранных взрывов рыхление горной массы всегда производилась в направлении датчика №3, при этом длина блоков варьировалась от участка к участку от 23 м до 155 м, а расстояние до охраняемого объекта оставалась практически неизменным около 25 м. Масса зарядов в каждой скважине согласно паспорту буровзрывных работ изменялась от 2,5 кг до 23 кг. Благодаря схеме монтажа взрывной сети с интервалами замедления на магистрали 67 мс и между скважинами в 42 мс. Массовый взрыв можно рассматривать как серию последовательных частично взаимодействующих взрывов.

Исходя из параметров блока, а также полученных в ходе экспериментальных взрывов коэффициентов сейсмичности ($K=542$) и коэффициентов затухания ($n=2,2$), по формуле М.А. Садовского была построена модельная велосиграмма суммарного вектора скорости от действия различных рядов взрываемого блока на точку регистрации сигнала рисунок 7. Далее было выполнено сопоставление взрываемых рядов с временными значениями полученных сейсмограмм. Проведя наложение расчетных значений на фактические данные скоростей колебаний, полученных в ходе мониторинга, проводилась оценка сходимости модели.

На рисунке 8 показана зависимость амплитудных значений суммарного вектора скорости от времени, где синим цветом обозначены реальные данные, а оранжевым модельное пиковые значения скорости смещения.

Рисунок 9 отражает изменения амплитудных значений скорости смещения в зависимости от места расположения датчика. Наблюдается рост амплитудных значений при установке датчика в конце взрываемого блока, однако на коротких блоках отклонения реальной амплитуды от расчетных не превышает максимальных

расчетных скоростей. При оценке 20 взрывов разной протяженности был сделан вывод о том, что наилучшее место установки датчика соответствует датчику №2 (по центру взрываемого блока). Такое расположение дает полную картину максимального расчетного воздействия в любой момент времени на любую точку наблюдения.

Как видно из рисунков 8 и 9 реальные значения скорости смещения не превышают расчетные по формуле М.А. Садовского значения максимальной скорости смещения, однако совсем другую картину можно наблюдать на блоках протяженностью в два и более раза превышающую расстояние до охраняемого объекта. На рисунке 10 превышение составляет 21%, зарегистрированная скорость принимает значение 52 мм/с. Данные отклонения расчетных и экспериментальных значений скорости СВВ можно наблюдать и на других блоках большой протяженности. примеры таких отклонений представлен на рисунке 11, здесь превышение фактической скорости над расчетной составляет уже 70%. 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, под которым СВВ приходит в точку наблюдения.

На всех проанализированных блоках большой протяженности, разница между превышающими пиками, составляет приблизительно 400 мс. Для уменьшения суммарной пиковой скорости смещения предложено изменить схему инициирования. Использовать группу зарядов с большим временем замедлением расположенную каждый 11 ряд, учитывая сетку скважин 11 рядов, будет составлять протяженность в 17 м. Построив модельную сейсмограмму применения такой схемы инициирования был получен результат, при котором фактические значения скорости смещения не превышают расчетных, рисунок 12. 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. Однако, применение такой схемы инициирования влечёт за собой повышение вероятности отказов, в следствии подбоя взрывной сети. В таком случае, при взрывании

удлинённых блоков с использованием применяемой схемы инициирования необходимо производить корректировку расчетных значений скорости смещения учитывая фактор увеличения пиковой скорости колебаний. Для более точной оценки предложено использовать дополнительный коэффициент K , учитывающий протяжённость взрываемого блока равный 1,5 для боков равных трем расстояниям до охраняемого объекта и 1,7 для блоков протяженностью в пять расстояний до действующего газопровода.

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 полученные 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 взрывающего 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 протяженность взрывающего блока. Коэффициент соответствующей протяженности блока (при относительном расстоянии $R_{отн} = 2, K=1,3; R_{отн} = 3, K=1,5; R_{отн} = 5, K=1,7$).

6. 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Хохлов, С.В. Особенности сейсмического мониторинга при ведении взрывных работ вблизи действующего газопровода / С.В. Хохлов, Ю.И. Виноградов, **С.Т. Соколов** // Известия Тульского государственного университета. 2019(1), стр. 296-305. // <https://elibrary.ru/item.asp?id=38304136> (МБДиСЦ; Web of Science).

2. Виноградов, Ю.И. Методические принципы измерения кусковатости горной массы / Ю.И. Виноградов, **С.Т. Соколов**, С.В. Хохлов, А.В. Баженова // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле 2020(1). С. 112-123. // <https://elibrary.ru/item.asp?id=44021495> (МБД и СЦ; Web of Science).

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. 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. // <http://testmagazine.biz/index.php/testmagazine/article/view/1388>.

4. Хохлов, С.В. Проведение промышленных взрывов вблизи газопровода / С.В. Хохлов, **С.Т. Соколов**, Ю.И. Виноградов, И.Б. Френкель // Записки горного института Записки Горного Института. Том 247. С. 48-56. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.6.

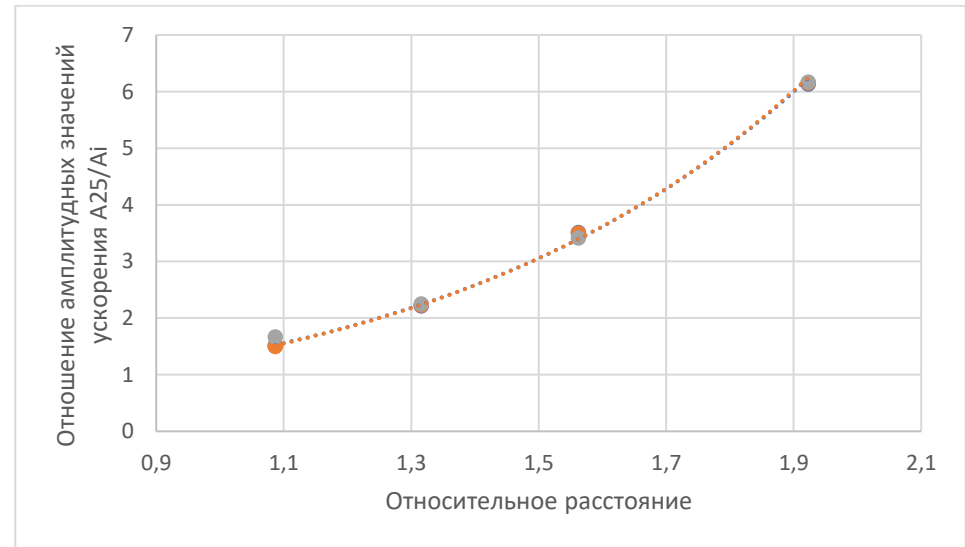
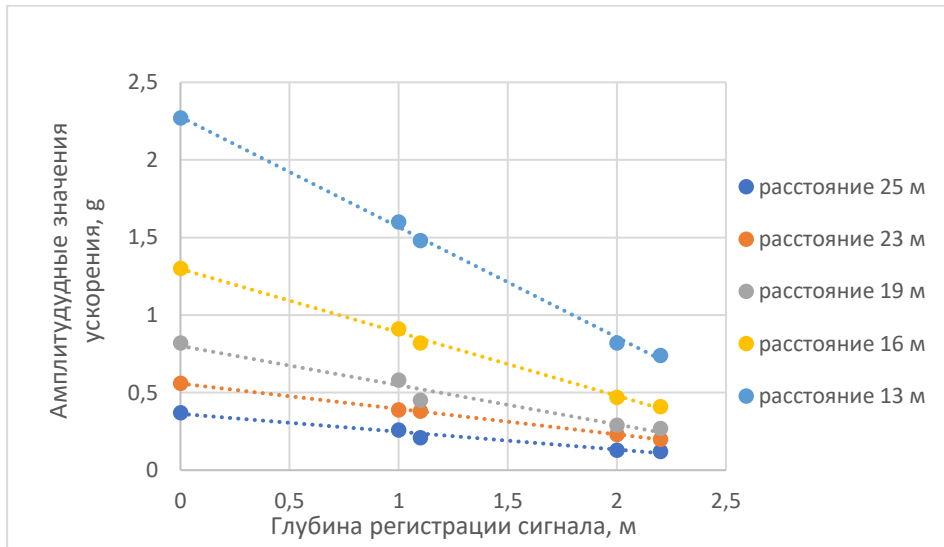
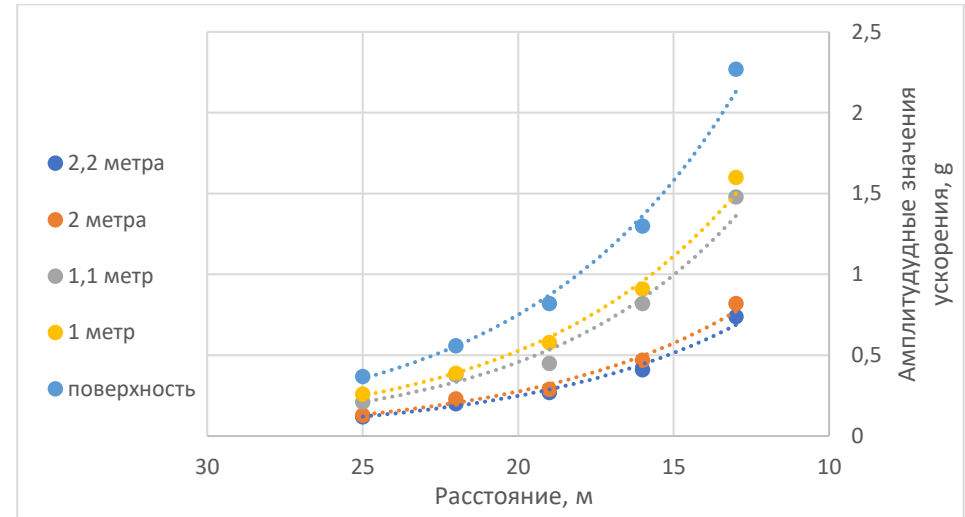
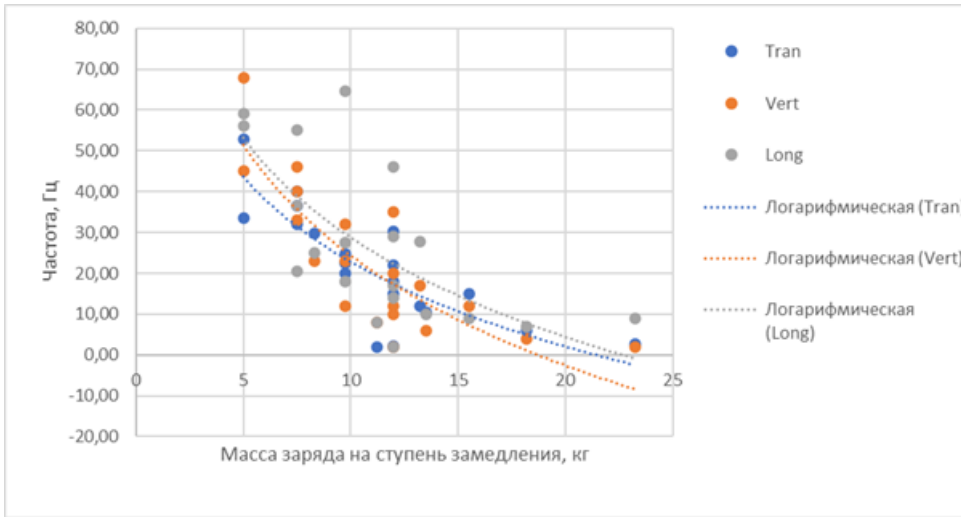
Публикации в прочих изданиях:

5. **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.

Патенты:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612020 Российская Федерация, Расчет термодинамических характеристик реакции взрывчатого разложения смесового ВВ №2017663326/69: заявл. 09.02.18: опубл. 10.04.2018 / Чернобай В.И., Молдован Д.В., **Соколов С.Т.**, Ильинец А.А; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 12 с.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614524 Российская Федерация, Расчет сейсмически безопасных параметров массовых взрывов для зданий и сооружений вблизи карьеров № 2018611919/69: заявл. 27.02.18: опубл. 10.11.2018 / Хохлов С.В., Виноградов Ю.И., **Соколов С.Т.**; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 26 с.



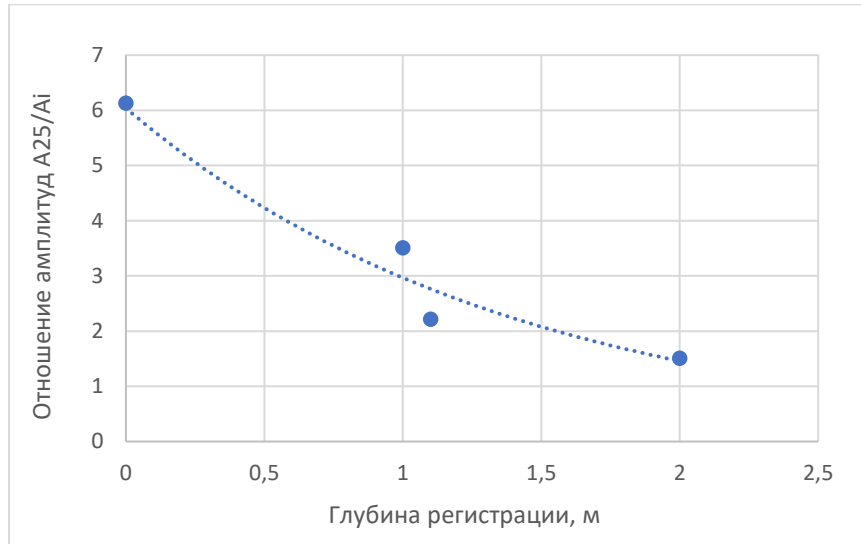


Рисунок 6 – Зависимость изменения амплитудных значений горизонтальной составляющей ускорения смещения с изменением глубины регистрации сигнала

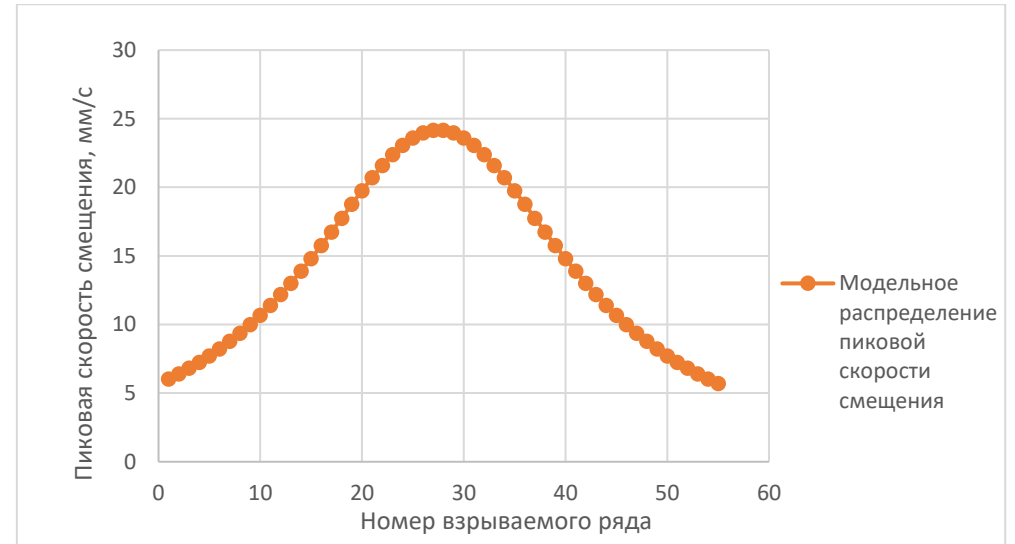


Рисунок 7 – Модельное распределение пиковой скорости смещения, мм/с

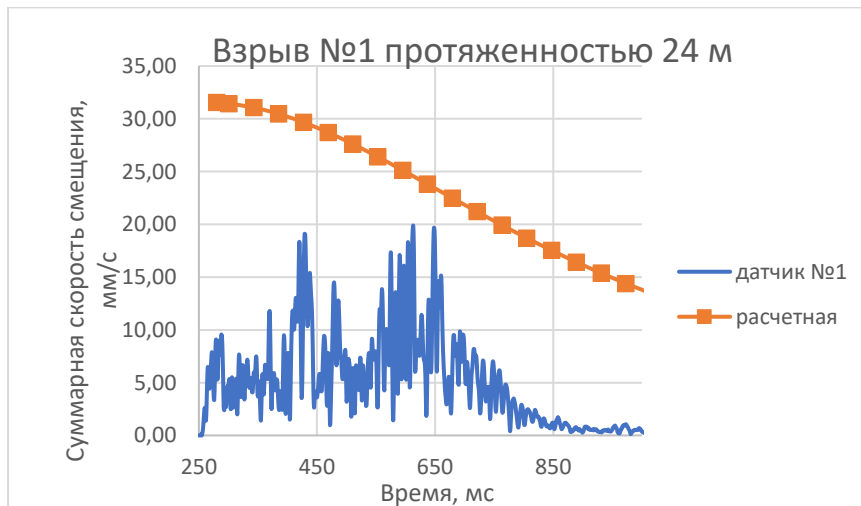


Рисунок 8 – Зависимость скорости от времени, взрыв № 1

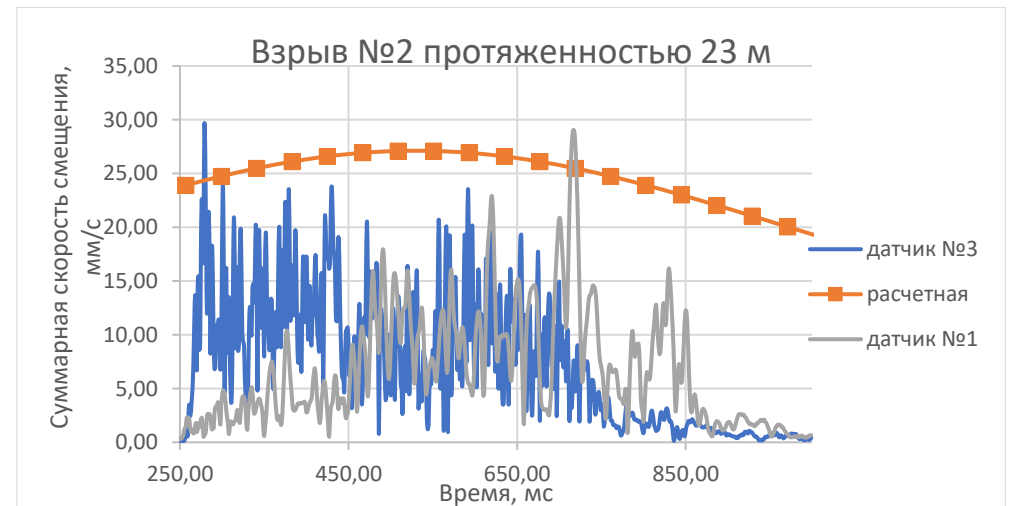


Рисунок 9 – Зависимость скорости от времени, взрыв № 2

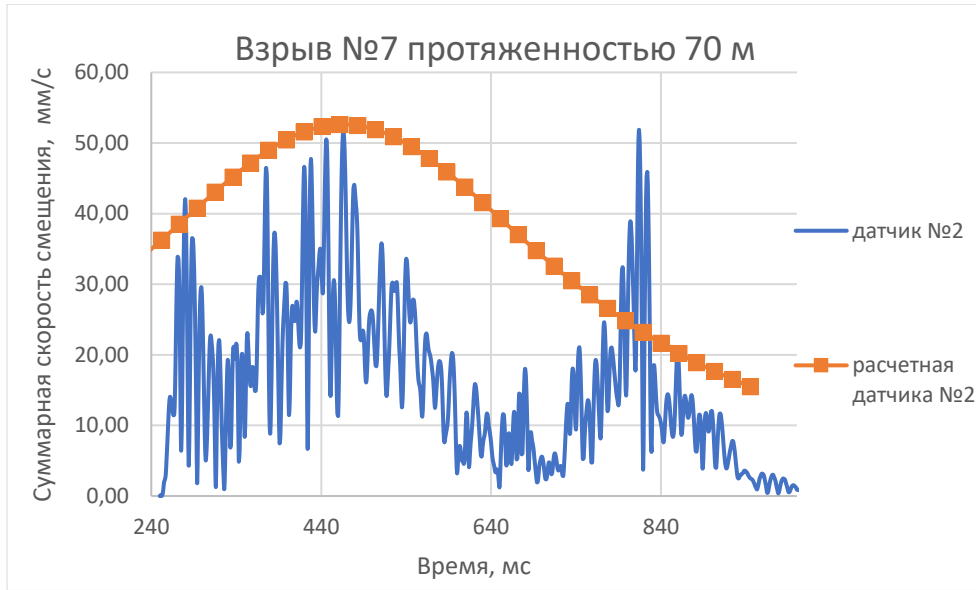


Рисунок 10 – Зависимость скорости от времени, взрыв №7

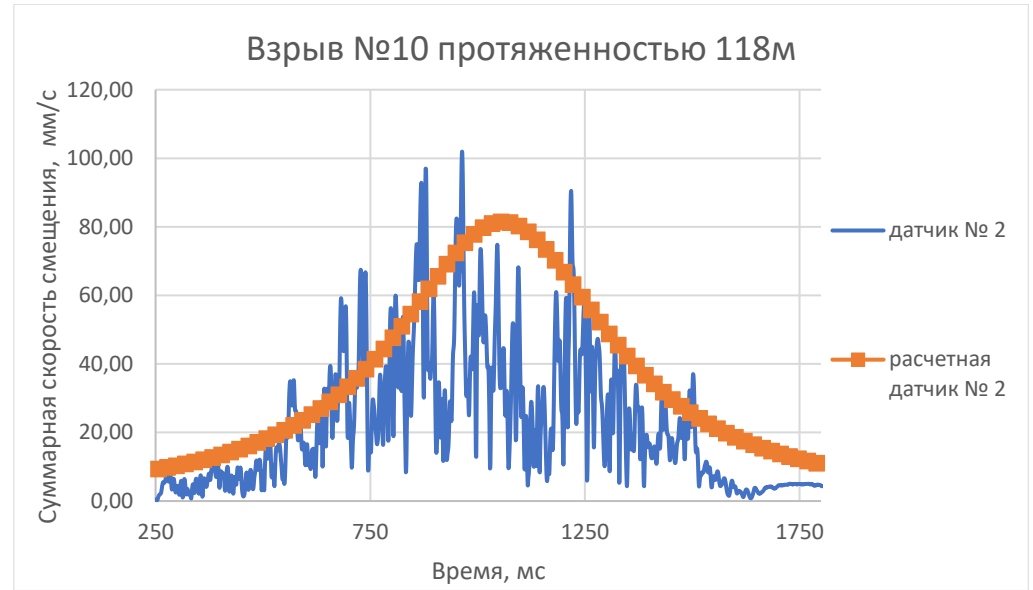


Рисунок 11 – Зависимость скорости от времени, взрыв №10

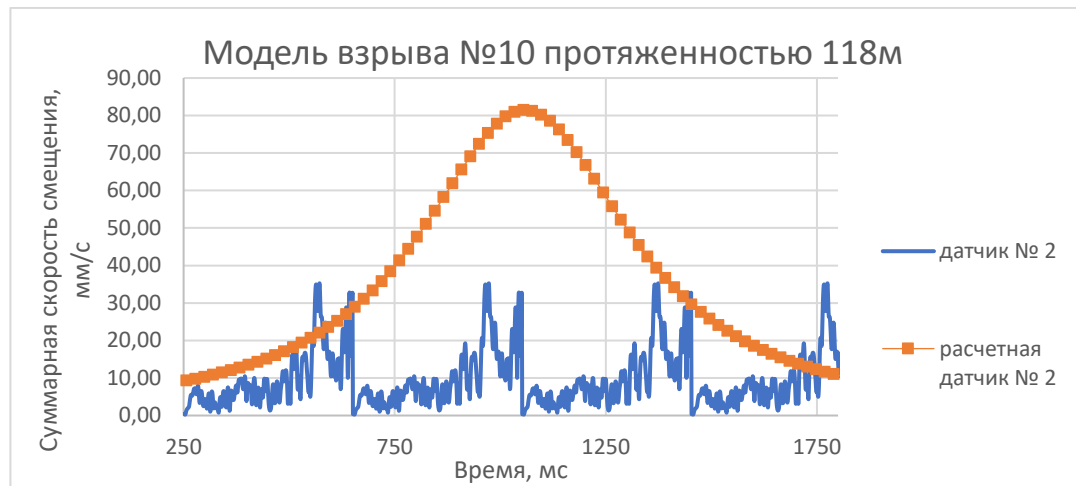


Рисунок 12 – Модельная зависимость скорости от времени, при применении увеличенных интервалов замедления