

На правах рукописи

Холодилов Андрей Николаевич



**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА ДИНАМИЧЕСКОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ
НА ОХРАНЯЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ**

Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

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

Санкт-Петербург – 2023

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

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Господариков Александр Петрович

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;

Тюпин Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», кафедра прикладной геологии и горного дела, профессор;

Джигрин Анатолий Владимирович

доктор технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Геотехнология-взрывозащита», генеральный директор.

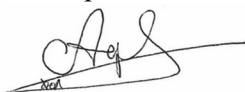
Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **19 декабря 2023 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

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

Автореферат разослан 19 сентября 2023 г.

УЧЕНЬИЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Буровзрывные работы нашли широкое применение при добыче твердых полезных ископаемых. При этом не более 15...20% энергии взрывчатых веществ идет на дробление горных пород. Часть неиспользуемой энергии расходуется на образование сейсмозврывных волн (далее - СВВ) и ударных воздушных волн (далее - УВВ). Последние характеризуются большим радиусом действия и являются причиной негативного воздействия на близлежащие производственные и социальные охраняемые объекты, существенно снижая их эксплуатационные характеристики вплоть до катастрофического разрушения несущих элементов, служат причиной дискомфорта пребывания в них производственного персонала и населения.

Технология буровзрывных работ постоянно совершенствуется: появляются новые промышленные взрывчатые вещества и средства их инициирования. Процесс внедрения новых технологических решений в производство, как правило, сопровождается изменением уже отработанных проектных параметров буровзрывных работ. В частности, это связано с погрешностями интервалов короткозамедленного взрывания широко используемых систем инициирования неэлектрического взрывания. Следствием этого может быть высокий уровень сейсмического воздействия на здания и сооружения.

В процессе отработки месторождения полезного ископаемого, особенно подземным способом, развивается обширная сеть горных выработок. В результате этого происходит перераспределение потоков сейсмической энергии от взрывного источника, которое создает предпосылки дополнительного сейсмического воздействия на охраняемые объекты.

Несмотря на достаточную изученность воздействия УВВ на наземные здания и сооружения относительно их раскочки по сравнению с аналогичным воздействием СВВ, пери-

одически возникают претензии относительно высокого уровня колебаний объектов. Это относится к взрывам на карьерах, дроблению негабаритов и утилизации боеприпасов взрывным способом. При этом уровень избыточного давления на фронте УВВ, как правило, не превышает 200 Па и часто бывает меньше указанного значения.

Таким образом, необходимость разработки научных основ прогноза динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты является неотъемлемой частью обеспечения безопасного ведения буровзрывных работ.

Степень разработанности темы исследования

Фундаментальные основы воздействия УВВ и СВВ на здания и сооружения были заложены академиками М.А. Садовским, Е.И. Шемякиным, В.В. Адушкиным и др. Большой вклад в дальнейшие теоретические исследования по данной тематике и внедрение практических результатов в производственную практику внесли В.А. Белин, Е.К. Борисов, С.Д. Викторов, М.А. Ганопольский, А.П. Господариков, Н.Н. Гриб, А.А. Еременко, В.М. Закалинский, С.А. Козырев, Б.Н. Кутузов, С.В. Медведев, М.Г. Менжулин, П.С. Миронов, В.Н. Мосинец, В.С. Очиров, Л.В. Сафонов, А.А. Спивак, В.Н. Тюпин, Я.И. Цейтлин, Б.В. Эквист и др. Среди зарубежных ученых, предложивших различные формулы для оценки сейсмического воздействия взрыва, следует отметить Duvall N.I., Ambrasey N.R., Hendron A.J., Langefors U., Kihlstrom B. В последнее десятилетие проблема прогнозирования уровня воздействия промышленных взрывов на охраняемые объекты базируется на широком применении методов искусственных нейронных сетей (Khandelwal M., Singh T.N.).

Однако, существующие способы обеспечения безопасного ведения взрывных работ не позволяют в полной мере спрогнозировать реакцию охраняемых объектов даже в случае слабых воздействий СВВ и УВВ. Обозначенная проблема

требует проведения экспериментально-теоретических исследований, позволяющих выявлять опасные резонансные проявления динамического воздействия взрывных работ на начальных стадиях их развития, на основе современных методологических подходов к определению динамических характеристик наземных зданий и сооружений, грунтов вблизи их оснований.

В целом, за последние десятилетия накоплен обширный экспериментальный материал по воздействию СВВ и УВВ на наземные объекты, который требует систематизации для развития научных основ в области обеспечения безопасного ведения буровзрывных работ. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пункту 5 «Теоретические основы, математические модели и способы управления состоянием и поведением массивов горных пород и грунтов с целью обеспечения устойчивости горных выработок, подземных и наземных сооружений, предотвращения проявлений опасных горно-геологических явлений» и пункту 10 «Воздействие взрывов на массив горных пород, горные выработки, подземные и наземные сооружения, на окружающую среду».

Объект исследования – взрывные работы на месторождениях твердых полезных ископаемых, добываемых открытым и подземным способами.

Предмет исследования – динамические характеристики наземных зданий и сооружений, грунтов вблизи их оснований.

Цель работы – установление закономерностей пространственного и временного распределения СВВ и УВВ при ведении взрывных работ, позволяющих обосновать прогноз колебаний охраняемых объектов.

Идея работы – прогноз и управление динамическим воздействием при производстве взрывных работ для обеспе-

чения безопасности охраняемых объектов необходимо осуществлять на основе экспериментально установленных закономерностей и теоретических моделей пространственного и временного распределения СВВ и УВВ.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих **задач**:

- провести анализ современного состояния вопроса в области обеспечения безопасного ведения взрывных работ по воздействию СВВ и УВВ на охраняемые объекты;

- разработать теоретическую модель совместного определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмозрывных волн (далее – показатель затухания) для повышения надежности прогноза скорости смещения грунта в основании охраняемого объекта;

- разработать научные основы классификации взрывов по уровню опасности их сейсмического воздействия на охраняемые объекты;

- разработать теоретическую модель обнаружения сейсмических воздействий как источников неучтенных опасностей для наземных охраняемых объектов при ведении взрывных работ в подземных условиях;

- провести исследование динамического воздействия на здания и сооружения при взрывании на земной поверхности и разработать способ определения колебательных мод наземных охраняемых объектов при импульсном воздействии УВВ и способ обнаружения опасного совместного воздействия СВВ и УВВ на охраняемый объект.

Таким образом, **актуальной задачей** исследований является реализация экспериментально-теоретического подхода к прогнозу динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты.

Научная новизна работы:

1. Впервые установлены пространственные и временные закономерности скорости смещения грунта при ведении взрывных работ на карьерах с учетом зависимости между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания, позволяющие существенно повысить надежность прогноза сейсмического воздействия на охраняемые объекты при меньшей выборке экспериментальных данных.

2. Впервые разработана классификация взрывных работ как сейсмических источников по степени их опасности: повышенного, нормального и пониженного воздействий на охраняемые объекты.

3. Установлены логнормальный и нормальный законы распределений коэффициента сейсмичности и показателя затухания соответственно, что позволяет расширить возможности учета факторов, влияющих на количественные оценки прогноза воздействия СВВ на охраняемые объекты.

4. Установлены уровни сейсмического воздействия на наземные сооружения в зависимости от относительного вклада поверхностных и объемных СВВ в модуль вектора скорости смещения грунта, позволяющие выделить наиболее опасное воздействие поверхностных СВВ на охраняемые объекты.

5. Впервые определены условия возникновения и предупреждения опасных резонансных явлений в системе «грунт – охраняемый объект» при короткозамедленном взрывании по факторам как воздействия СВВ, так и совместного воздействия СВВ и УВВ на охраняемый объект.

Теоретическая значимость работы заключается:

1. В выявлении дополнительных источников сейсмических колебаний, представляющих потенциальную угрозу охраняемым объектам при ведении взрывных работ;

2. В установлении теоретических закономерностей между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания;

3. В обосновании вида и параметров статистических распределений коэффициента сейсмичности и показателя затухания;

4. В установлении факта связи между уровнем динамического воздействия на охраняемый объект и смещением его колебательного спектра;

5. В доказательстве совместного воздействия СВВ и УВВ на охраняемый объект с учетом короткозамедленного взрывания.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны научные основы прогноза сейсмического воздействия взрывных работ с учетом связи между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания.

2. Разработаны принципы количественной классификации взрывных источников по их сейсмическому воздействию.

3. Разработан критерий безопасного ведения взрывных работ при наличии дополнительных источников сейсмических колебаний.

4. Разработаны подходы снижения совместного воздействия СВВ и УВВ на охраняемый объект.

5. Получен акт внедрения в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» от 17.04.2023.

Реализация работы. Диссертационная работа выполнена в период с 2003 года по 2023 год на кафедре взрывного дела. Проведены научно исследовательские работы: «Экспертная оценка воздействия взрывных работ на обогатительную фабрику № 16 и нефтебазу, находящуюся в зоне горных работ, и разработка рекомендаций, обеспечивающих безопасность ведения горных и взрывных работ на карьере «Нюрбинский»» (2003г., 2004г.); научно исследовательская работа по контрактам № К39.05/09/03/0079, № К39.15/06/04.0063 «Разработка технологий и мер по снижению уровня опасного техногенного воздействия взрывных работ на горнодобывающих

предприятиях и уменьшению потерь минерального сырья» (2003-2005 г.г.); научно исследовательская работа «Разработка технологических мероприятий по снижению уровня опасного воздействия взрывных работ на окружающую среду и повышение эффективности использования природных ресурсов», г/б № 6.30.008.2 (2007 г.); научно исследовательская работа «Отработка параметров буровзрывных работ в условиях Ново-Широкинского месторождения» по договору с ОАО «Ново-Широкинский рудник» (2010 г.); научно исследовательская работа «Исследование и экспертная оценка безопасности действующего газопровода при ведении вблизи него буровзрывных работ» по договору с ОАО «Ленгазспецстрой» (2011 г.); научно исследовательская работа № 5857 от 11.01.2012 г. «Разработка технологий и рекомендаций по снижению опасных факторов техногенного воздействия взрывных работ и уменьшению потерь минерального сырья на горнодобывающих предприятиях», проводимой по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации (2012 г.).

Методология и методы исследования. В основу методологии исследований диссертационной работы легли труды ученых в области теории сейсмичности промышленных взрывов, УВВ, а также научные разработки, посвященные методам определения параметров СВВ и УВВ.

Использовались методы поиска и обработки научно-технической информации с помощью российской библиографической базы «РИНЦ» и зарубежной наукометрической базы «Scopus»; современные методы математической статистики и цифровой фильтрации при обработке и анализе экспериментальных данных; полигонные и промышленные исследования параметров СВВ и УВВ; математическое моделирование отклика наружных объектов и грунта на динамическое воздействие от взрывных работ.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Прогнозное значение скорости смещения грунта в основании охраняемых объектов по сейсмическому фактору безопасного ведения взрывных работ на карьерах необходимо определять классификационным критерием уровня сейсмического воздействия взрыва на основе коэффициента сейсмичности в диапазоне от 100 до 800 и показателя затухания в диапазоне 1,56-2,04.

2. Классификационные критерии для оценки опасности взрывов как сейсмических источников, характеризуемых колебательной скоростью, измеренной в см/с, по соотношению между показателем затухания - n в диапазоне 0,7-3,8 и коэффициентом сейсмичности K в диапазоне от 6 до $3 \cdot 10^3$ определяются следующим образом: сейсмические источники повышенного воздействия - $n < 0,23 \ln K + 0,33$, нормального воздействия - $0,23 \ln K + 0,63 \geq n \geq 0,23 \ln K + 0,33$ и пониженного воздействия - $n > 0,23 \ln K + 0,63$.

3. Прогноз уровня сейсмического воздействия на наземные сооружения в зависимости от интервалов времени короткозамедленного взрывания, а также оперативное обнаружение опасных колебаний в системе «грунт – охраняемый объект» при ведении взрывных работ в подземных условиях следует вести по способу аппроксимации волновых форм велосиграмм с использованием эллиптических фильтров низкой частоты 2-го порядка.

4. Опасность взрывных работ на земной поверхности по фактору колебаний объектов, расположенных в зоне воздействия слабых ударных воздушных и сейсмических волн, характеризуется совместным воздействием сейсмозрывной и ударной воздушной волн, приводящим к усилению колебаний при переходе от нижней части сооружения к его крыше до 15 раз, и снижением уровня колебаний при увеличении интервала времени короткозамедленного взрывания от 20 мс до 45 мс.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена:

- соответствием методологии анализа СВВ и УВВ научно доказанным и практически апробированным положениям теоретических и прикладных наук и непротиворечивостью разработанных в диссертационной работе теоретических моделей существующим научным представлениям;

- использованием известных методик и специализированного оборудования, применяемого в международной практике ведения взрывных работ, для регистрации и обработки СВВ и УВВ;

- статистически значимым объемом экспериментальных данных, полученным для широкого диапазона изменения основных параметров буровзрывных работ (весьма детально исследовано более 30 взрывов различного назначения);

- областью достоверного определения параметров СВВ и УВВ, в пределах которой устанавливается соответствие между модельными и экспериментальными кривыми;

- широкой географией измеренных и заимствованных экспериментальных данных (около сотни пар значений коэффициента сейсмичности и показателя затухания).

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1. Закономерности динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты. XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2023» 30 января – 3 февраля 2023 г., Москва.

2. Современные методы прогнозирования динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты. IV Международная научно-практическая конференция: Санкт-Петербургский горный университет, 26-28 октября 2021 г., Санкт-Петербург.

3. Методика прогнозирования колебаний наземных объектов при импульсном воздействии воздушных ударных волн. XXVIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2020» 27-31 января 2020 г., Москва.

4. Методология оперативного прогнозирования сейсмического действия массовых взрывов. II-я международная научно-техническая конференция «Инновационное развитие горнодобывающей отрасли», 14 декабря 2017 г., Кривой Рог, Украина.

5. Методология оценки сейсмической безопасности массовых взрывов, производимых на подземных рудниках вблизи надшахтных сооружений. «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование». Международная научно-практическая конференция, посвященная 110-летию горного факультета: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 28-29 октября 2015 г., Санкт-Петербург.

6. A new approach in seismic safety evaluation for blasting operations performed by Russian mining companies. 14th SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, 17-26 June 2014, Bulgaria.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке теоретических моделей, проведении полигонных и промышленных измерений, получении основных теоретических и практических результатов в области динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты, в анализе и обобщении материалов, представленных в публикациях, которые выполнены в соавторстве.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 25 печатных работах, в том числе в 10 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых

научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 5 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и систему цитирования Scopus. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, словаря терминов, списка литературы, включающего 246 наименований, и 5 приложений. Диссертация изложена на 256 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков и 33 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному консультанту доктору технических наук Господарикову А.П., доктору технических наук Белину В.А., доктору технических наук Ганопольскому М.И., доктору технических наук Еременко А.А. за ценные замечания при выполнении и обсуждении результатов исследований, сотрудникам кафедры взрывного дела за советы и помощь, оказанные при выполнении работы, а также членам ученого совета ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности» за вопросы, позволившие улучшить изложение основных положений диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние вопроса в области безопасности взрывных работ по воздействию СВВ и УВВ. Отмечено, что из качественного анализа пар

«коэффициент сейсмичности – показатель затухания», представленных В.Н. Мосинцом, вытекает факт существования зависимости между этими параметрами. Показаны связи между резонансными явлениями в массиве горных пород и усилением сейсмического воздействия взрыва, между техногенной нагрузкой на окружающую среду и объемом взрывных работ. Установлено, что совместное воздействие СВВ и УВВ на наземные объекты есть мало исследованная проблема. В конце главы приведена коллекция пар «коэффициент сейсмичности – показатель затухания» для разнообразных условий взрывания.

Во второй главе представлены результаты экспериментально-теоретических исследований для установления зависимости между показателем затухания и коэффициентом сейсмичности. Предложен и верифицирован классификационный критерий для прогноза скорости смещения грунта в основании охраняемых объектов от массовых взрывов на карьерах и в подземных условиях.

В третьей главе проведен анализ причин отклонений от классификационного критерия в широком диапазоне изменений коэффициента сейсмичности и показателя затухания, на основе которого построена классификация взрывов как сейсмических источников по степени их воздействия на охраняемые объекты. Представлены параметры статистических распределений коэффициента сейсмичности и показателя затухания.

В четвертой главе рассмотрен вклад продольных и поверхностных волн в сейсмическое воздействие взрыва. Приведена и апробирована модель для обнаружения дополнительного источника сейсмических колебаний в системе «грунт – охраняемый объект» при подземном взрывании и регистрации скорости смещения грунта на земной поверхности.

В пятой главе изложен способ установления колебательных мод объекта по эпюрам его колебательных скоростей

от взрыва наружного заряда взрывчатого вещества; приведены результаты динамического воздействия массовых взрывов на наземное сооружение; предложен и обоснован способ спектрального представления колебаний объекта, позволяющий установить факт совместного воздействия СВВ и УВВ на него.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Прогнозное значение скорости смещения грунта в основании охраняемых объектов по сейсмическому фактору безопасного ведения взрывных работ на карьерах необходимо определять классификационным критерием уровня сейсмического воздействия взрыва на основе коэффициента сейсмичности в диапазоне от 100 до 800 и показателя затухания в диапазоне 1,56-2,04.

Массовый взрыв рассматривается как последовательность частично взаимодействующих относительно СВВ i -х мгновенных взрывов, характеризующихся массами заряда взрывчатого вещества Q_i и средними расстояниями до пункта регистрации сейсмозврывных колебаний R_i . Тогда для определения значения модуля вектора скорости смещения грунта применима дискретная экспериментальная функция вида (1):

$$v_m(t_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^3 v_j^2 \left(\frac{R_i(t_i)}{\sqrt[3]{Q_i(t_i)}} \right)}, \quad (1)$$

где v_j – регистрируемые компоненты вектора скорости смещения;

t_i – время срабатывания i -й ступени замедления, отсчитываемое от момента взрыва заряда взрывчатого вещества в ступени нулевого замедления.

Аппроксимация функции (1) представлена в виде (2):

$$v_{ма}(t_i) = K_a \left(\frac{R_i(t_i)}{\sqrt[3]{Q_i(t_i)}} \right)^{-n_a}, \quad (2)$$

где K_a и n_a – параметры аппроксимации, являющиеся оценками коэффициента сейсмичности K и показателя затухания n .

Регистрируемое значение модуля вектора скорости смещения посредством аналогово-цифрового преобразования сигнала сейсмических датчиков компонент скорости смещения представляет собой функцию вида (3):

$$v_M(t_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^3 v_j^2(t_k)}, \quad (3)$$

где t_k – текущий момент выборки измерительного сигнала.

Для сравнения величин $v_M(t_i)$ и $v_M(t_k)$, а так же и $v_{Ma}(t_i)$, необходимо применить к ним одно и тоже временное преобразование в виде операции низкочастотной цифровой фильтрации. После фильтрации определяются огибающие функций (1)-(3).

Нахождение параметров K_a и n_a сводится к решению нелинейной задачи: методом наименьших квадратов найти минимум функции вида (4):

$$F(K_a, n_a) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[K_a \left(\frac{R_i(t_i)}{\sqrt[3]{Q_i(t_i)}} \right)^{-n_a} - v_{Ma}(t_i) \right]^2}, \quad (4)$$

где N – количество ступеней замедления.

В качестве оценки параметра K_a в работе используется формула В.Ф. Богацкого (5):

$$K_a = A \cdot \sqrt[3]{\frac{C_p}{\rho} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{C_s^2}{C_p^2} \right)^2}, \quad (5)$$

где C_p – скорость распространения продольных СВВ, м/с;

C_s – скорость распространения поперечных СВВ, м/с;

ρ – плотность грунта, кг/м³,

A – масштабный коэффициент.

Если модуль скорости смещения v_M измеряется в см/с, масса заряда Q – в кг, а расстояние R в м, то масштабный коэффициент $A = 1000$.

Модель апробирована при исследовании воздействия СВВ на железнодорожный тоннель массовым взрывом, произведенным на железорудном карьере Коршуновского ГОКа.

Для каждого K_a определялось оптимальное значение n_a , для которого средняя квадратичная ошибка принимает минимальное значение (рисунок 1). Анализ рисунка 1 позволяет установить функциональную связь между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания вида (6):

$$n = 0,23 \ln(8,8K). \quad (6)$$

Используя формулы (6) и М.А. Садовского, получим выражение для прогноза пикового значения модуля скорости смещения вида (7):

$$v_{\Pi} = K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-0,23 \ln(8,8K)}. \quad (7)$$

Прогнозное пиковое значение модуля скорости смещения грунта по сейсмическому фактору безопасного ведения взрывных работ на карьерах определяется классификационным критерием, согласно формулам (5-7), на основе показателя затухания в диапазоне 1,56-2,04 и коэффициента сейсмичности в диапазоне 100-800. Оценка параметров по формулам (5-6) для условий карьера «Коршуновский» дает: $K = 530$, $n = 1,95$.

Полученный классификационный критерий верифицировался по результатам исследования сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемый целик на гранитном карьере «Вуокса», расположенном в Выборгском районе Ленинградской области. Было установлено, что выражение (7) справедливо при условии, что значение $\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} < 30$.

Справедливость классификационного критерия была подтверждена и при исследовании сейсмического воздействия подземных взрывов на надшахтные сооружения для условий ОАО «Ново-Широкинский рудник».

2. Классификационные критерии для оценки опасности взрывов как сейсмических источников, характеризуемых колебательной скоростью, измеренной в см/с, по соотношению между показателем затухания - n в диапазоне 0,7-3,8 и коэффициентом сейсмичности K в диапазоне от 6 до $3 \cdot 10^3$ определяются следующим образом: сейсмические источники повышенного воздействия - $n < 0,23 \ln K + 0,33$, нормального воздействия - $0,23 \ln K + 0,63 \geq n \geq 0,23 \ln K + 0,33$ и пониженного воздействия - $n > 0,23 \ln K + 0,63$.

Приведем выражение (6) к виду (8):

$$n = 0,23 \ln(K) + 0,5. \quad (8)$$

Для определения физического смысла второго слагаемого формулы (8) преобразуем выражение (7) к виду (9):

$$v = K \left(\frac{R}{3\sqrt{Q}} \right)^{-0,23 \ln(K)} \cdot Q^{\frac{1}{6}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R}}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что $v \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$, т.е. второе слагаемое в (8) указывает на цилиндрический тип источника. Если связать множитель $\frac{1}{\sqrt{R}}$ формулы (9) с геометрией зарядов взрывчатого вещества относительно точки наблюдения сейсмического сигнала, то второе слагаемое в (8) не может быть отрицательным, так как это противоречит закону сохранения энергии. В то же время допускаются точки, лежащие выше графика функции $n = 0,23 \ln(K) + 1,0$, в котором второе слагаемое соответствует сферическому источнику СВВ. Анализ формулы (8) для совершенных условий взрывания приводит к выводу, что она соответствует источникам нормального сейсмического воздействия.

Установим количественные интервальные критерии источников по типу сейсмического воздействия. Для статистической выборки объема N - (n_i, K_i) , $1 \leq i \leq N$ существуют оценки свободного члена \hat{a} и углового параметра \hat{b} . Тогда

оценкой показателя затухания будет уравнение линейной регрессии (10):

$$\hat{n} = \hat{a} + \hat{b} \ln K. \quad (10)$$

В качестве правила построения статистической выборки из совокупности данных выберем следующее. Для каждого K значение n при заданном Δn попадает в интервал, определяемый неравенствами (11):

$$0,23 \ln(K) + 0,5 - \Delta n \leq n \leq 0,23 \ln(K) + 0,5 + \Delta n. \quad (11)$$

Если выбрать $\Delta n = 0,01$ и увеличивать его последовательно на $0,01$, то получим ряд статистических выборок. Для каждой выборки вычислим оценки \hat{a} и \hat{b} , установим их доверительные интервалы и коэффициенты корреляции r . Результаты вычислений сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты вычислений оценок \hat{a} и \hat{b}

Условие (объем выборки, число точек)	Доверительный интервал при доверительной вероятности 95%		r^2
	\hat{a}	\hat{b}	
$\Delta n = 0,10$; (29)	$0,52 \pm 0,05$	$0,222 \pm 0,018$	0,96
$\Delta n = 0,26$; (66)	$0,38 \pm 0,15$	$0,24 \pm 0,03$	0,82
$\Delta n = 0,27$; (68)	$0,34 \pm 0,15$	$0,25 \pm 0,03$	0,82
$\Delta n = 0,36$; (81)	$0,31 \pm 0,16$	$0,25 \pm 0,03$	0,78
$\Delta n = 0,41$; (82)	$0,30 \pm 0,16$	$0,25 \pm 0,03$	0,78

Из анализа таблицы 1 вытекают следующие выводы:

1. Оценка углового параметра $b = 0,23$ в формуле (8) попадает в доверительный интервал для всех условий или 89% пар по K и n из общей совокупности данных;

2. Оценка свободного параметра $a = 0,5$ в формуле (8) при условии $\Delta n = 0,26$ попадает в доверительный интервал для 72% пар по K и n из общей совокупности данных;

3. Статистически значимые оценки, близкие к значениям углового и свободного параметров уравнения (8), соответствуют условию $\Delta n = 0,10$ для 32% пар по K и n из общей совокупности данных;

4. При $\Delta n = 0,36$ резко замедляется рост объема статистических выборок.

5. В рамках статистической ошибки верхние границы доверительных интервалов для условий $\Delta n = 0,10$ и $\Delta n = 0,26$ будем считать совпадающими.

6. При условии $\Delta n = 0,36$ для среднего значения $\overline{\ln K}$ ($K = 186$) оценка \hat{n} на величину 0,1 будет меньше аналогичного значения, вычисленного по формуле (8).

С учетом выводов 1-3, 5-6 для источников нормального сейсмического воздействия разумно положить границы изменения свободного параметра в формуле (8), соответствующие условию $\Delta n = 0,26$ с оценкой \hat{a} , увеличенной на 0,1. Тогда классификационная граница между источниками повышенного и нормального сейсмического воздействия будет определяться формулой (12):

$$n_n = 0,23 \ln K + 0,33; \quad (12)$$

между источниками пониженного и нормального сейсмического воздействия формулой (13):

$$n_b = 0,23 \ln K + 0,63. \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) верифицировались по количественным признакам промышленных взрывов:

- как источников повышенного сейсмического воздействия: ведение взрывных работ в обводненных условиях; взрывание весьма крепких горных пород; крупномасштабное взрывание; проблема выбора массы одновременно взрывааемых групп зарядов взрывчатого вещества при короткозамедленном взрывании относительно ширины окна интервала замедления; проблема технологического разброса времен срабатывания систем инициирования неэлектрического взрывания;

- как источников нормального и пониженного сейсмических воздействий: взрывание при ведении взрывных работ подземным способом с регистрацией сейсмических колебаний на земной поверхности; одновременное взрывание групп зарядов взрывчатого вещества небольшой массы (сотни килограммов взрывчатого вещества); взрывные работы в гражданском строительстве, предварительное щелеобразование.

На рисунке 2 представлена графическая интерпретация предлагаемой классификации сейсмических источников.

Коэффициент сейсмичности и показатель затухания как случайные величины подчиняются логнормальному и нормальному распределениям соответственно. Оценки параметров статистических распределений коэффициента сейсмичности и показателя затухания: математических ожиданий $\overline{\ln K}$, \bar{n} ; среднего квадратичного отклонения σ_K ; среднего значения \bar{K} ; медианы $K_{\text{мед}}$ сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Оценки параметров статистических распределений

Условие	$\overline{\ln K}$	σ_K	\bar{K}	$K_{\text{мед}}$	\bar{n}
$6 < K < 3000$ ($N = 82$)	$5,23^{+0,27}_{-0,27}$	$1,22^{+0,19}_{-0,19}$	390^{+265}_{-150}	185^{+55}_{-45}	$1,60^{+0,08}_{-0,08}$
$20 < K < 3000$ ($N = 77$)	$5,40^{+0,23}_{-0,23}$	$1,03^{+0,17}_{-0,17}$	375^{+200}_{-120}	220^{+60}_{-45}	$1,64^{+0,07}_{-0,07}$

3. Прогноз уровня сейсмического воздействия на наземные сооружения в зависимости от интервалов времени короткозамедленного взрывания, а также оперативное обнаружение опасных колебаний в системе «грунт – охраняемый объект» при ведении взрывных работ в подземных условиях следует вести по способу аппроксимации волновых форм велосиграм с использованием эллиптических фильтров низкой частоты 2-го порядка.

Источником СВВ является возмущение среды вблизи взрывной скважины. Будем считать, что на расстоянии 60-ти

радиусов взрывной скважины в скальной породе возмущение носит упругий затухающий характер. В первом приближении примем функцию возмущения скального массива в виде известной зависимости избыточного давления атмосферного воздуха от времени в заданной точке вида (14):

$$\Delta P(t) = \Delta P_o \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \exp\left(-a \frac{t}{\tau}\right), \quad (14)$$

где ΔP_o – избыточное давление на фронте УВВ;
 τ – длительность фазы сжатия;
 a – эмпирический коэффициент.

При фиксированном расстоянии от заданной точки до очага возмущения согласно формуле М.А. Садовского скорость смещения представим в виде (15):

$$v = v_0 \left(\frac{Q}{Q_{max}}\right)^n, \quad (15)$$

где v_0 – скорость смещения, соответствующая максимальной массе заряда взрывчатого вещества в серии взрывов (Q_{max});
 Q – масса заряда взрывчатого вещества в серии.

Для одиночного взрыва $v = v_0$, т.е. величина v_0 представляет собой масштабирующий множитель. С учетом (14) получим выражение для скорости смещения в заданной точке в зависимости от времени вида (16):

$$v(t) = v_0 \left(\frac{Q}{Q_{max}}\right)^n \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \exp\left[-a \left(\frac{t}{\tau}\right)^b\right], \quad (16)$$

где b – эмпирический коэффициент, учитывающий различие акустических импедансов горной породы и атмосферного воздуха.

С учетом короткозамедленного взрывания в случае массового взрыва формула (16) преобразуется к виду (17):

$$v(t) = v_0 \sum_{k=1}^N \left\{ \left(\frac{Q_k}{Q_{max}}\right)^n \left(1 - \frac{t-t_{зам,k}}{\tau'}\right) \exp\left[-a \left(\frac{t-t_{зам,k}}{\tau'}\right)^b\right] \right\}, \quad (17)$$

где Q_k – масса заряда взрывчатого вещества в k -й ступени замедления;

$t_{\text{зам}, k}$ - момент времени срабатывания k -й ступени замедления, отсчитанный от момента времени инициирования группы зарядов взрывчатого вещества нулевой ступени замедления;
 τ' - характерная продолжительность фазы сжатия.

В приближении сферического источника сейсмическое воздействие взрыва достаточно ограничить совместным вкладом первичных объемных продольных волн и вторичных поверхностных волн Релея. Тогда в предположении аддитивности вертикальных компонент волны Релея и продольной волны скорость смещения имеет вид (18):

$$v' = \eta_{\text{пр}}v(t) + \eta_R v(t - \tau_{\text{зад}}), \quad (18)$$

где $\eta_{\text{пр}}$ доля амплитуды скорости результирующего колебания, обусловленная вкладом продольных волн;

η_R то же – поверхностных волн;

$\tau_{\text{зад}}$ – время задержки прихода поверхностных волн в заданную точку относительно момента времени прихода продольных волн в ту же точку.

Актуальный вид модельных компонент велосигramмы получается в случае преобразования функции (18) с помощью фильтра нижних частот. Так как одним из модельных представлений массива является тело Гука, то порядок фильтра нижних частот должен быть четным (2-й, 4-й и т.д.). Согласно теореме Котельникова, примем частоту среза в виде $f_{\text{ср}} \approx 1/(2\tau')$. Затухание сейсмического сигнала в пределах полосы пропускания фильтра нижних частот $D_{\text{пп}}$ является характеристикой удаленности точки регистрации велосигramмы от очага взрыва. Этот параметр должен быть меньше величины затухания сейсмического сигнала за пределами полосы пропускания фильтра нижних частот $D_{\text{пз}}$, который примем равным 40 дБ. В качестве аппроксимации частотных характеристик фильтра выберем аппроксимацию в виде эллиптического фильтра нижних частот.

В приближении аддитивности вклада продольных и поверхностных СВВ в сейсмическое воздействие взрыва выражение (2) для вертикальной компоненты скорости смещения преобразуется к виду (19):

$$v_{\text{ма}}(t_i) = K_1(\bar{R}_{1i})^{-n_1} + K_2(\bar{R}_{2i})^{-n_2}, \quad (19)$$

где $\bar{R}_{1i} = \frac{R_{1i}(t_i)}{\sqrt[3]{Q_i(t_i)}}$ приведенное расстояние для продольных СВВ;
 $\bar{R}_{2i} = \frac{R_{2i}(t_i - t_3)}{\sqrt[3]{Q_i(t_i)}}$ – то же для поверхностных СВВ;

t_3 – время задержки прихода поверхностных СВВ в точку регистрации относительно момента времени прихода продольных СВВ;

K_1 , n_1 и K_2 , n_2 – коэффициенты сейсмичности и показатели затухания продольных и поверхностных СВВ соответственно.

Дальнейший анализ будем проводить в предположении существования поверхностных СВВ (I-го типа), образующихся в результате трансформации объемных волн на земной поверхности, и поверхностных СВВ (II-го типа), образующихся в результате трансформации объемных волн на поверхности горных выработок. На рисунке 3 приведены графики экспериментальной скорости смещения и ее аппроксимации, полученные с помощью фильтра нижних частот ($f_{\text{ср}} = 10$ Гц). Пик экспериментальной скорости смещения в интервале 0,5-0,6 с не может быть объяснен только СВВ, т.е. должен существовать дополнительный источник сейсмических волн, связанный с системой «грунт - охраняемый объект».

Проведем прогнозную оценку сейсмического воздействия массовых взрывов по волновым формам велосиграм. Фактический момент срабатывания k -й ступени замедления принимался в процессе моделирования. Параметры $D_{\text{пп}}$, v_0 , $\eta_{\text{пр}}$, η_R и $\tau_{\text{зад}}$ выбирались из условия наилучшего согласия модельной и экспериментальной велосиграм.

На рисунке 4 приведен пример моделирования волновой формы велосигаммы от массового взрыва.

Анализ волновых форм велосигамм приводит к выводам: при моделировании достаточно ограничиться эллиптическим фильтром 2-го порядка; высокая чувствительность способна к выявлению резонансных явлений в породном массиве; уверенно выявляются отклонения от проектных интервалов времени короткозамедленного взрывания; в отдельных случаях массовый взрыв по сейсмическому воздействию становится подобным одновременно взрываемому заряду. Определены ошибки расчета параметров при моделировании волновых форм велосигамм.

При выявленных резонансных явлениях количественный критерий безопасного ведения взрывных работ означает недопущение превышения значения пиковой скорости смещения вторичного источника значения пиковой скорости смещения взрывного источника.

Обоснуем принцип минимизации сейсмического воздействия массовых взрывов на основе выбора линии наименьшего сопротивления W по данным акселерометрии от одиночного взрыва.

А.Н. Ханукаев показал, что при скоростях смещения $v_{п}=1,3-1,5$ м/с происходит интенсивное трещинообразование в скальном массиве. Дробление массива будет, если принять скорость смещения в виде $v_{др} = (1,5 \dots 2) \cdot v_{п}$. Из формулы М.А. Садовского при условии $W = R$ следует выражение (20):

$$W = \sqrt[3]{Q}(K/v_{др})^{1/n}. \quad (20)$$

Для условий Ново-Широкинского месторождения оценка величины линии наименьшего сопротивления оказалась на 30% больше значения линии наименьшего сопротивления, принятого на руднике. Корректировка линии наименьшего сопротивления приводит к уменьшению удельного расхода

взрывчатого вещества и сейсмического воздействия массовых взрывов на охраняемые объекты.

4. Опасность взрывных работ на земной поверхности по фактору колебаний объектов, расположенных в зоне воздействия слабых ударных воздушных и сейсмических волн, характеризуется совместным воздействием сейсмо-взрывной и ударной воздушной волн, приводящим к усилению колебаний при переходе от нижней части сооружения к его крыше до 15 раз, и снижением уровня колебаний при увеличении интервала времени короткозамедленного взрывания от 20 мс до 45 мс.

Исследовались характеристики объектов: колебания жилого дома, источником которых служили УВВ от взрывных работ по утилизации боеприпасов наружных зарядов взрывчатого вещества на территории военного полигона, расположенного вблизи п. Кирилловское и п. Семиозерье Выборгского района Ленинградской области; колебания обогатительной фабрики №16 при динамическом воздействии на нее массовых взрывов, взрывов наружных зарядов взрывчатого вещества, произведенных на карьере «Нюрбинский».

Рассмотрим основные положения способа аппроксимации эпюр колебательной скорости здания при воздействии на него УВВ. Спектральный состав колебательных мод объекта находится как решение дифференциального уравнения (21):

$$\frac{d^2X}{dt^2} + 2\beta_i \frac{dX}{dt} + \omega_i^2 X = f(t), \quad (21)$$

где t – время;

$X \equiv x_i(t)$ – смещение;

$\frac{dX}{dt} \equiv v_i(t)$ – скорость;

$\frac{d^2X}{dt^2} \equiv a_i(t)$ – ускорение;

$f(t)$ – приведенная по массе вынуждающая сила;

β_i – коэффициент затухания;

ω_i – круговая частота затухающих колебаний.

Индекс « i » относится к i -й колебательной моде.

Общее решение для колебательной скорости с применением принципа линейной суперпозиции имеет вид (22):

$$v(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t), \quad (22)$$

где n - количество колебательных мод, характеризующее в «полной мере» динамические свойства охраняемого объекта. Этот параметр – неизвестная величина, устанавливаемая при условии наилучшего согласия моделируемой и экспериментальной кривых колебательной скорости $v(t)$ и $v_{\text{эксп}}(t)$ соответственно. Поскольку приведенная вынуждающая сила возбуждает все моды, то для нее также справедлив принцип линейной суперпозиции (23):

$$f(t) = \sum_{i=1}^n C_i \cdot f_i(t), \quad (23)$$

где C_i – доля вынуждающей силы, участвующей в возбуждении i -й колебательной моды.

Каждая i -я колебательная мода полностью определяется параметрами: ω_i, β_i, C_i .

На рисунке 5 приведены эпюры избыточного давления в УВВ, а на рисунке 6 – результаты моделирования колебательных мод жилого дома. Проведена оценка ошибок определения модельных параметров колебаний: амплитуды – 30-35%; частоты – 0,2-0,3 Гц; коэффициента затухания колебаний – 20-25%.

В предположении нормального закона распределения частот на вероятностной бумаге построены кумулятивные прямые частот колебательных мод, изображенные на рисунке 7. Из анализа рисунка 7 следует, что при слабом динамическом воздействии на охраняемый объект распределение его колебательных мод практически подчиняется нормальному закону. Поэтому для аппроксимации колебательной моды в частотном представлении правомерно использование кривой Гаусса.

Вследствие конечной длительности импульса УВВ и немонотонного характера затухания колебаний охраняемого

объекта (биений) создаются предпосылки возрастания амплитуды скорости колебаний спустя некоторое время после воздействия. В результате моделирования получено, что это явление реализуется при значении коэффициента затухания меньше $0,12 \text{ с}^{-1}$. Практически малые значения коэффициента затухания могут реализовываться в случае дефектов несущих элементов конструкции наземных объектов. Установлена линейная зависимость между пиковой скоростью колебаний здания и пиковым избыточным давлением на фронте УВВ.

Обогатительная фабрика представляет собой каркасное, панельное здание высотой до 40 м с основанием из железобетонных свай диаметром 0,6 м, длинами 10 и 14 м. В таблицу 3 сведены параметры основных взрывов и экспериментальные данные. На рисунке 8 изображены эпюры от опытно-промышленного массового взрыва.

Таблица 3 - Параметры взрывов и экспериментальные данные

Дата	Взрыв ¹⁾	Q_{Σ} , кг (N)	$R_{\text{пер}}$, м ($R_{\text{Оф}}$, м)	$(v_{\text{п}}, \text{см/с})$ $P_{\text{п}}$, Па
13.08.03	НЗ	60	612 (612)	$(0,2)^{2)}$
17.08.03	ОПМ	13018 (7)	1300 (1300)	$(0,12)^{2)}$ $(1,75)^{3)}$
12.09.04	1-й М	29979,6 (17)	1082 (1082)	$(1,58)^{3)}$
	2-й М	21672 (15)	1173 (1173)	$(0,72)^{3)}$
	1-й НЗ	120	1170 (1170)	$(1,62)^{3)}$
16.09.04	3-й М	13107,6 (22)	831 (1598)	63
	4-й М	41153,2 (25)	623 (1299)	До 240
	2-й НЗ	120	497 (1173)	920
18.09.04	5-й М	13550,8 (31)	520 (1537)	620
	3-й НЗ	120	365 (1390)	960

Примечание. ¹⁾ – буквами обозначены: «М» - массовый, «НЗ» - наружный заряд; «ОПМ» - опытно-промышленный массовый. ²⁾ – пиковое значение наиболее интенсивной ком-

поненты скорости колебаний нижней части обогатительной фабрики. ³⁾ – то же крыши обогатительной фабрики. Q_{Σ} – суммарная масса взрывчатого вещества в массовом взрыве или масса взрывчатого вещества в наружном заряде, N – количество ступеней замедления; $R_{рег}$ – расстояние от места взрыва до пункта регистрации; $R_{0ф}$ – то же до обогатительной фабрики; $P_{п}$ – пиковое избыточное давление в УВВ.

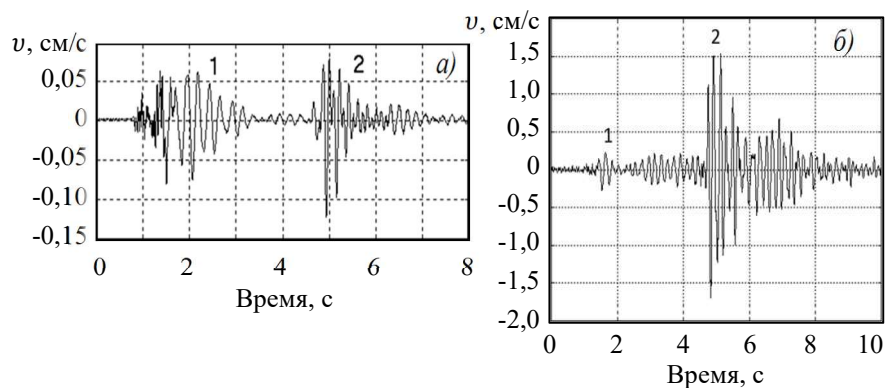


Рисунок 8 – Эпюры от опытно-промышленного массового взрыва: а) вертикальной компоненты скорости смещения нижней части обогатительной фабрики; б) радиальной компоненты скорости колебаний крыши. Цуги колебаний от воздействий: 1 – СВВ; 2 – УВВ

Из рисунка 8 следует сильное возрастание амплитуды скорости колебаний при переходе от нижней части обогатительной фабрики к ее крыше, что указывает на явление раскачки здания. Явление раскачки потребовало проведения совместных исследований динамического воздействия массовых взрывов и взрывов наружных зарядов взрывчатого вещества на обогатительную фабрику.

Предварительный прогноз воздействия УВВ на обогатительную фабрику основывался на известной методике Я.И. Цейтлина и экспериментальной зависимости между ско-

ростью колебаний здания и пиковым избыточным давлением в УВВ. Было установлено, что экспериментальное значение колебательной скорости крыши обогатительной фабрики превышало прогнозное значение почти в 2 раза. Для объяснения этого расхождения исследовался колебательный спектр здания при различных условиях динамического воздействия.

Из детального анализа мод следует, что с увеличением массы наружного заряда взрывчатого вещества происходит смещение спектра колебаний здания в область низких частот с уменьшением дисперсии колебательных мод.

Анализ колебательных мод обогатительной фабрики проводился: для опытно-промышленного массового взрыва и взрыва наружного заряда взрывчатого вещества массой 60 кг в нижней части здания (рисунок 9); для того же массового взрыва в верхней части (рисунок 10); для 2-го массового взрыва и взрыва 1-го наружного заряда взрывчатого вещества согласно таблицы 3 (рисунок 11).

Анализируя рисунки 9, 11, приходим к следующим выводам: при переходе от нижней части здания к его верхней происходит резкое возрастание амплитуды колебательной скорости до 15 раз в случае опытно-промышленного массового взрыва; различие динамического воздействия на здание при переходе от взрыва наружного заряда взрывчатого вещества к массовому взрыву выражается в появлении моды 5 Гц и смещении спектра колебательной скорости в область низких частот.

Анализ коэффициента затухания колебательных мод дает оценку в 1 с^{-1} . Окончание цуга колебаний от СВВ и начало цуга колебаний от УВВ разнесены по времени, по крайней мере, на 3 с. Это означает, что амплитуда колебаний от СВВ к моменту начала колебаний от УВВ должна уменьшиться в $e^3 \approx 20$ раз, т.е. по фактору затухания колебаний не должно быть совместного воздействия СВВ и УВВ в упрощенном понима-

нии динамического воздействия взрывных работ на обогатительную фабрику.

Дополнительная мода 5 Гц, характерная для вертикальной компоненты колебательной скорости нижней части здания, появляется в спектре радиальной компоненты скорости крыши здания именно после воздействия СВВ. Появление дополнительных колебательных мод, смещение колебательных мод по частоте является доказательством нелинейного поведения системы «грунт – охраняемый объект» при динамическом воздействии взрывных работ. Если исключить дополнительную колебательную моду 5 Гц, то исчезнет противоречие между прогнозными и фактическими значениями колебательной скорости.

Между опытно-промышленным взрывом с одной стороны и 1-м, 2-м массовыми взрывами с другой стороны есть существенное различие. Если в первом случае взрыв производился с интервалом замедления 20 мс, то во втором случае интервал замедления составлял 45 мс. При воздействии опытно-промышленного взрыва на здание успевает произойти формирование мощной колебательной моды 5 Гц, т.е. происходит аккумуляция энергии СВВ и энергии УВВ в одном временном окне посредством перестройки колебательного спектра здания. При воздействии на здание других массовых взрывов не происходит формирования мощной колебательной моды 5 Гц. На самом деле, в спектре радиальной компоненты колебательной скорости обнаруживается мода 6,3 Гц (рисунок 11, б). Это свидетельствует о том, что порций сейсмической энергии, поступающих в основание здания при интервале замедления 45 мс, не достаточно для создания сильной раскачки. Доказательством того, что сейсмическая энергия поступает порциями, является наличие полосы с максимумом, расположенным на частоте 21,8 Гц (рисунок 11, а), которая соответствует интервалу времени замедления 45 мс. Если сравнивать воздействие

1-го и 2-го массовых взрывов на здание от момента прихода УВВ, то обнаружится, что 1-й массовый взрыв (при его близком расположении к зданию и большей массе взрывчатого вещества по сравнению со 2-м массовым взрывом согласно таблице 3 приводит к меньшей раскачке здания, нежели 2-й массовый взрыв.

Таким образом, имеет место совместное воздействие СВВ и УВВ на обогатительную фабрику от массовых взрывов, проявляющиеся в явлении сильной раскачки наружной части здания. При этом раскачка здания существенно уменьшается при переходе к большим интервалам времени короткозамедленного взрывания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе выполненного комплекса исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых квалифицируется как решение научной проблемы по основам прогноза динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты, включающее установленные закономерности пространственного и временного распределений сейсмозрывных и ударных воздушных волн, имеющее существенное значение для повышения безопасности ведения взрывных работ на предприятиях минерально-сырьевого комплекса Российской Федерации.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. При проведении анализа литературных источников не выявлены: количественная связь между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания СВВ и классификация взрывных работ по сейсмическому воздействию на охраняемые объекты; способы прогноза резонансных явлений в массиве горных пород при подземных массовых взрывах и критерий безопасного ведения взрывных работ в этом случае; количественные критерии, позволяющих минимизировать воздей-

ствие на наземные охраняемые объекты как исключительно по фактору УВВ, так и при совместном воздействии УВВ и СВВ на основе актуальных динамических характеристик самих объектов.

2. Установлены пространственные и временные закономерности скорости смещения грунта при ведении взрывных работ на карьерах в зависимости от показателя затухания сейсмозрывных волн и коэффициента сейсмичности. Прогнозное значение скорости смещения грунта в основании охраняемых объектов по сейсмическому фактору безопасного ведения взрывных работ на карьерах определяется классификационным критерием уровня сейсмического воздействия взрыва на основе показателя затухания СВВ в диапазоне 1,56-2,04 и коэффициента сейсмичности в диапазоне от 100 до 800.

3. Впервые определена классификация взрывов как сейсмических источников по уровню опасности воздействия на охраняемые объекты. Установлены логарифмически нормальный закон распределения коэффициента сейсмичности и нормальный закон распределения показателя затухания СВВ.

4. Разработаны и обоснованы классификационные критерии опасности взрывов как сейсмических источников, характеризующихся колебательной скоростью, измеренной в см/с, по соотношению между показателем затухания - n в диапазоне 0,7-3,8 и коэффициентом сейсмичности K в интервале от 6 до $3 \cdot 10^3$: сейсмические источники повышенного воздействия - $n < 0,23 \ln K + 0,33$, нормального воздействия - $0,23 \ln K + 0,63 \geq n \geq 0,23 \ln K + 0,33$ и пониженного воздействия - $n > 0,23 \ln K + 0,63$.

5. Установлены уровни сейсмического воздействия на наземные сооружения в зависимости от относительного вклада поверхностных и объемных СВВ в модуль вектора скорости смещения грунта. При ведении взрывных работ уровень сейсмического воздействия на наземные сооружения определяется

относительным вкладом поверхностных и объемных сейсмических волн в модуль вектора скорости смещения грунта, а предельное значение уровня сейсмического воздействия соответствует равенству пиковых значений скоростей смещения от дополнительного источника колебаний системы «грунт – охраняемый объект» и взрывного источника волн.

6. Разработан способ аппроксимации волновых форм велосиграмм с использованием эллиптических фильтров низкой частоты 2-го порядка для прогноза уровня сейсмического воздействия на наземные сооружения в зависимости от интервалов времени короткозамедленного взрывания, а также для оперативного обнаружения опасных колебаний в системе «грунт – охраняемый объект» при ведении взрывных работ в подземных условиях.

7. Разработан способ определения колебательных мод наземных охраняемых объектов при импульсном воздействии УВВ.

8. Установлены закономерности скорости колебаний наземных объектов относительно интервала короткозамедленного взрывания и разработан способ обнаружения опасного совместного воздействия СВВ и УВВ на объект, приводящего к усилению колебаний при переходе от нижней части объекта к его крыше до 15 раз, и снижением уровня колебаний при увеличении интервала времени короткозамедленного взрывания взрывчатого вещества от 20 до 45 мс.

9. Разработанные положения по прогнозу динамического воздействия взрывных работ на промышленные здания и сооружения использованы при отработке месторождений Нюрбинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО), ОАО «Ново-Широкинский рудник», АО «Каменногорское карьероуправление», АО «Каменногорский комбинат нерудных материалов» (ККНМ), на Шерегешской шахте АО «Евраз ЗСМК».

10. Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию: для практического применения на предприятиях, добывающих твердые полезные ископаемые открытым и подземными способами с использованием взрывных работ; в организациях, осуществляющих мониторинг сейсмозрывного и воздушного ударного воздействий; в проектных организациях горной промышленности для разработки дополнительных мероприятий по обеспечению безопасного ведения взрывных работ в условиях, аналогичных рассмотренным в диссертации; в учреждениях высшего образования при подготовке инженеров по специальности «Горное дело» и на курсах повышения квалификации и профессиональной переподготовки.

11. Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационной работы целесообразны в следующих направлениях: развитие классификации взрывов как сейсмических источников по уровню опасности воздействия на охраняемые объекты по мере получения новых данных сейсмического мониторинга взрывных работ; создание теории резонансных явлений в системе «грунт – охраняемый объект» после окончания воздействия взрывного источника на основе методов квантово-механического формализма для прогнозирования риска разрушения охраняемого объекта и районирования территории, примыкающей к зоне ведения взрывных работ, по уровню динамического воздействия на здания и сооружения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Парамонов, Г.П. Разработка технологий и мер снижения воздействия сейсмических и ударных воздушных волн на окружающую среду, здания и сооружения при производстве взрывных работ на горных предприятиях / Г.П. Парамонов, В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов, **А.Н. Холодилов** // Записки Горного института. – 2004. – Т.158. – С.160-162.

2. Парамонов, Г.П. Новый метод оценки предельных значений раскачки зданий при воздействии на них сейсмических и воздушных ударных волн / Г.П. Парамонов, В.А. Артемов, **А.Н. Холодилов**, Е.Ю. Виноградова // Записки Горного института. – 2005. – Т.166. – С.156-159.

3. **Холодилов, А.Н.** Проблемы обеспечения сейсмической безопасности при строительстве транспортных тоннелей / **А.Н. Холодилов**, С.Г. Гендлер, Е.Ю. Виноградова, А.С. Шиляев // Записки Горного института. – 2007. – Т.171. – С.229-232.

4. Ковалевский, В.Н. Сравнительный анализ взрывных работ, проводимых на карьерах строительных материалов в Финляндии и России / В.Н. Ковалевский, **А.Н. Холодилов** // Записки Горного института. – 2007. – Т.171. – С.192-194.

5. Артемов, В.А. Оценка влияния взрывных работ на людей, находящихся в наземных сооружениях / В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов, Г.П. Парамонов, **А.Н. Холодилов** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №55. – С.410-414.

6. **Холодилов, А.Н.** Способ оценки параметров сейсмического действия массового взрыва на карьере по результатам измерений в одной точке / **А.Н. Холодилов**, А.С. Шиляев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №58. – С.245-248.

7. Артемов, В.А. Исследование сейсмобезопасных условий производства массовых взрывов на руднике ОАО «Ново-Широкинский рудник» / В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов, **А.Н. Холодилов**, С.В. Густов, Н.Я. Щербаков // Взрывное дело. – 2011. – №105/62. – С.239-252.

8. Артемов, В.А. Методические основы оценки сейсмического действия массовых взрывов по результатам анализа сейсмозрывных продольных и поверхностных волн / В.А. Артемов, Г.П. Парамонов, **А.Н. Холодилов** // Взрывное дело. – 2012. – №108/65. – С.287-296.

9. **Холодилов, А.Н.** Методические основы выбора линии наименьшего сопротивления при взрывной отбойке горных пород на основе данных акселерометрии / **А.Н. Холодилов**, В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №5. – С.314-318.

10. **Холодилов, А.Н.** Методология оценки сейсмической безопасности массовых взрывов, производимых на подземных рудниках, вблизи надшахтных сооружений / **А.Н. Холодилов**, А.П. Господариков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №2. – С.320-328.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

11. **Kholodilov, A.** A new approach in seismic safety evaluation for blasting operations performed by Russian mining companies / **A. Kholodilov**, A. Gospodarikov, A. Miasnikov // 14th SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference Proceedings (Albena, 17-26 June 2014). – Bulgaria: STEF92 Technology Ltd, 2014. – Vol.3. – P.3-9.

12. Belin, V.A. Methodical principles of prediction of seismic effect due to large-scale blasting / V.A. Belin, **A.N. Kholodilov**, A.P. Gospodarikov // Gornyi Zhurnal. – 2017. – No 2. – P.66-69.

13. **Kholodilov, A.N.** Modeling Seismic Vibrations under Massive Blasting in Underground Mines / **A.N. Kholodilov**, A.P. Gospodarikov // Journal of Mining Science. – 2020. – V.56. – P.29-35.

14. **Kholodilov, A.N.** Method for forecasting of surface facilities vibrations reasoned by impulse action of air shock waves / **A.N. Kholodilov**, Yu.I. Vinogradov // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2021. – No 2. – P.55-63.

15. **Kholodilov, A.N.** Procedural framework for explosion classification by the seismic load criterion / **A.N. Kholodilov**,

A.P. Gospodarikov, A.A. Eremenko // Gornyi Zhurnal. – 2021. – No 5. – P.98-102.

Публикации в прочих изданиях:

16. Парамонов, Г.П. К оценке влияния взрывных работ на здания и сооружения, расположенные вблизи промышленной зоны карьера / Г.П. Парамонов, В.А. Артемов, **А.Н. Холодилов** // Физические проблемы разрушения горных пород: труды IV-й Международной научной конференции (Москва, 18-22 октября 2004 г.). – М.: ИПКОН РАН, 2005.– С. 399-402.

17. **Холодилов, А.Н.** Технические средства мониторинга параметров воздушных ударных волн / **А.Н. Холодилов**, В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов // Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: Труды 9-й международной научно-практической конференции (Воркута, 6-8 апреля 2011 г.). – Воркута: Филиал СПГГИ(ТУ) «Воркутинский горный институт», 2011. – С.209-210.

18. Артемов, В.А. Проблемы обеспечения сейсмической безопасности надшахтных сооружений при проведении подземных массовых взрывов / В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов, **А.Н. Холодилов** // Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Горного института КНЦ РАН (Апатиты, 12-15 октября 2010 г.). – Апатиты, СПб, 2011. – С.165-168.

19. **Kholodilov, A.N.** Increase of Reliability of the Estimation of Seismic Safety of Ground Constructions of the Mountain Enterprises, Leaders Explosive Works / **A.N. Kholodilov** // Proceedings of the 7th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction (Xiamen, August 10-13, 2011). – China: Metallurgical Industry Press, 2011. – P.445-447.

20. **Холодилов, А.Н.** Повышение надежности прогноза сейсмического действия промышленных взрывов /

А.Н. Холодилов // «Взрывная технология. Эмпирика и теория. Достижения. Проблемы. Перспективы» - Международная научно-практическая конференция: материалы конференции (27-28 октября 2011 г.). – Тула: ТулГУ, 2011. – С.69-74.

21. **Холодилов, А.Н.** Минимизация ущерба от далекодействующих факторов промышленных взрывов / **А.Н. Холодилов** // Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: Труды 10-й международной научно-практической конференции (Воркута, 11-13 апреля 2012 г.). – Воркута: Филиал НСМУ «Горный» «Воркутинский горный институт», 2012. – Т.2. – С.295-297.

22. **Холодилов, А.Н.** Проблемы обеспечения безопасности по сейсмическому и воздушно-ударному факторам промышленных взрывов / **А.Н. Холодилов** // «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» - 8-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики: материалы конференции (1-2 ноября 2012 г.). – Тула: ТулГУ, 2012. – Т.1. – С.284-288.

23. **Холодилов, А.Н.** Методология оценки сейсмической безопасности массовых взрывов, производимых на подземных рудниках вблизи надшахтных сооружений / **А.Н. Холодилов** // «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование». Международная научно-практическая конференция, посвященная 110-летию горного факультета: тезисы докладов (Санкт-Петербург, 28-29 октября 2015 г.). – СПб: НМСУ, 2015. – С.74.

24. **Холодилов, А.Н.** Методология оперативного прогнозирования сейсмического действия массовых взрывов / **А.Н. Холодилов** // Инновационное развитие горнодобывающей отрасли - II-я Международная научно-техническая интернет-конференция: тезисы докладов (Кривой Рог, 14 декабря

2017 г.). – Кривой Рог: Криворожский национальный университет, 2017. – С.216.

25. **Холодилов, А.Н.** Современные методы прогнозирования динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты / **А.Н. Холодилов** // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование - IV Международная научно-практическая конференция: тезисы докладов (Санкт-Петербург, 26-28 октября 2021 г.). – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С.36.

Патенты:

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660214 Российская Федерация. Расчет критической массы заряда для охраняемых объектов: № 2017617172; заявл. 21.07.2017; опубл. 19.09.2017. / Ишейский В.А., Звонарев И.Е., **Холодилов А.Н.**; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614973 Российская Федерация. Программа для моделирования сейсмического воздействия вблизи оснований наземных охраняемых объектов с учетом структурных особенностей массива при подземных взрывах: № 2023613697; заявл. 02.03.2023; опубл. 09.03.2023. / **Холодилов А.Н.** Ковалевский В.Н., Рядинский Д.Э.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616009 Российская Федерация. Программа для моделирования колебательного спектра зданий при воздействии на них воздушной ударной волны: № 2023613987; заявл. 03.03.2023; опубл. 21.03.2023. / **Холодилов А.Н.**, Ковалевский В.Н., Рядинский Д.Э.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.

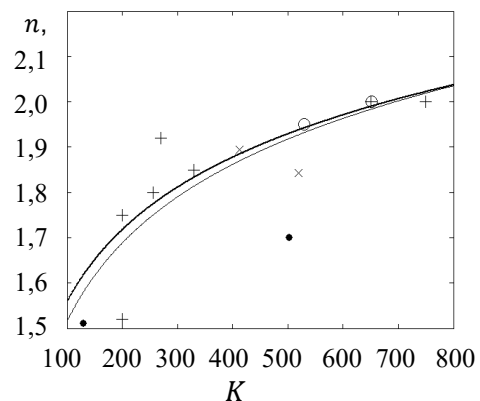


Рисунок 1 – Графики зависимостей показателя затухания от коэффициента сейсмичности (верхняя кривая). «+» - данные В.Н. Мосинца и их аппроксимация (нижняя кривая). Ссылки на данные «·», «x», «o» - приведены в статье [12]

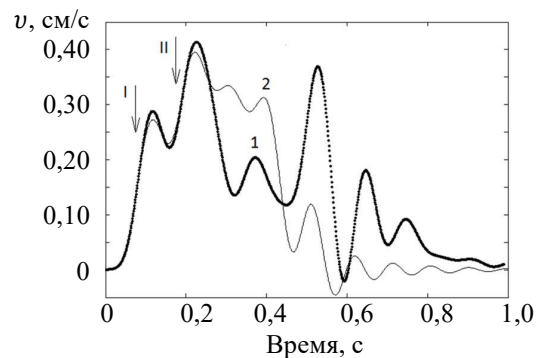


Рисунок 3 – Графики скорости смещения для экспериментального взрыва: 1 – эксперимент; 2 – аппроксимация. Стрелки - вступления поверхностных СВВ I-го и II-го типа

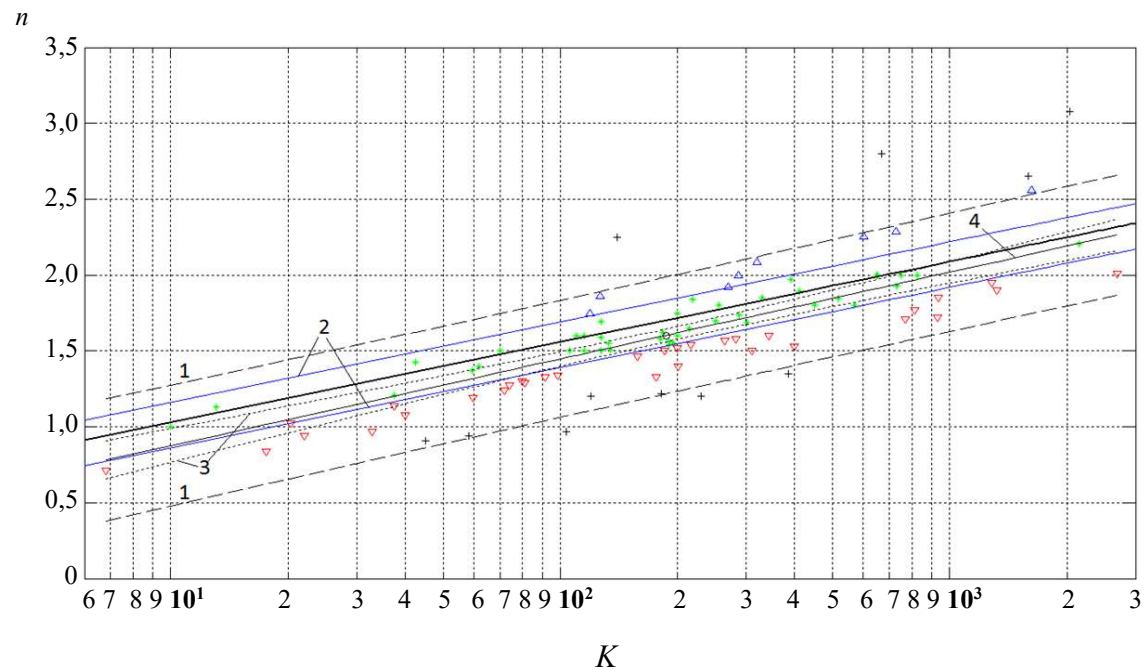


Рисунок 2 – Классификация сейсмических источников: «*» - нормального воздействия, «∇» - повышенного воздействия, «Δ» - пониженного воздействия. «+» - данные, исключенные из статистического анализа, «o» - $\ln K$. Границы доверительных интервалов - «1» - индивидуальных значений показателя затухания СВВ, «3» - $\ln K$. «2» - классификационные границы сейсмических источников. «4» - график линейной регрессии выборки для условия $\Delta n = 0,36$. Сплошная толстая линия - график уравнения (8). Экспериментальные данные заимствованы из открытых источников

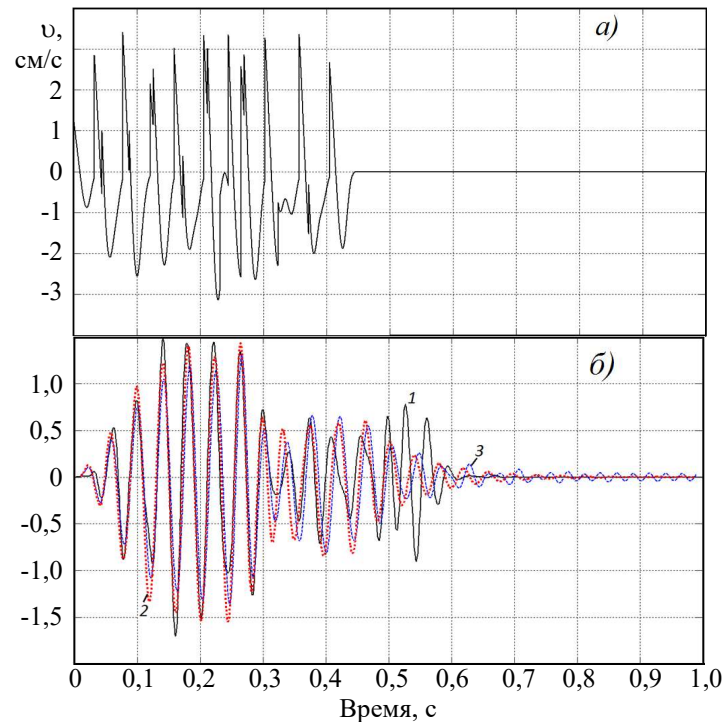


Рисунок 4 – а) Модельная функция вертикальной компоненты скорости смещения. б) Велосиграммы: 1 – экспериментальная; 2 – модельная с использованием ФНЧ 2-го порядка; 3 – то же 4-го порядка

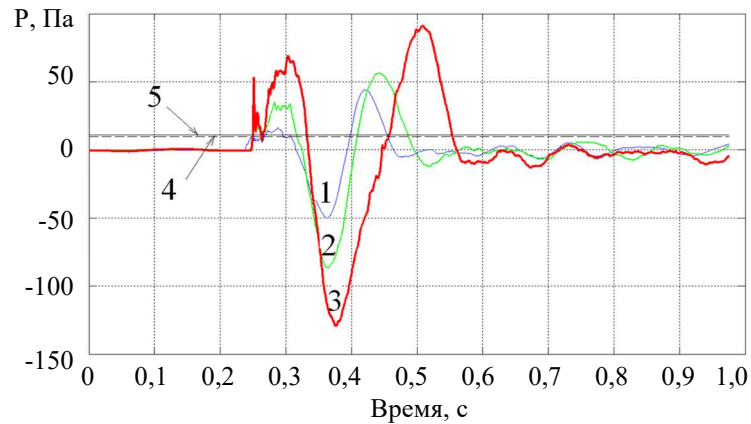


Рисунок 5 – Эпюры избыточного давления: 1 – 50,3 Па; 2 – 86,8 Па; 3 – 129 Па. 4 – пороговое давление; 5 – пиковое фоновое давление воздуха

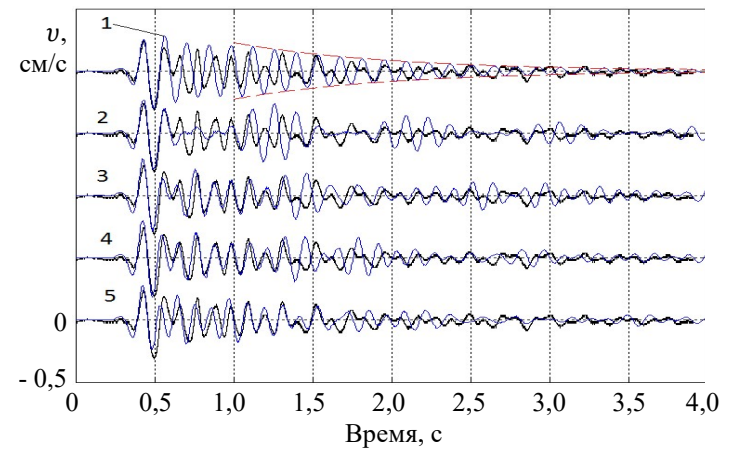


Рисунок 6 – Графики моделируемых и экспериментальной колебательных скоростей для $P = 50,3$ Па при количествах мод n : 1 – $n = 1$; 2 – $n = 3$; 3 – $n = 5$; 4 – $n = 7$; 5 – $n = 9$. Пунктиры - огибающие моделируемой скорости ($\beta = 1 \text{ c}^{-1}$)

Вероятность

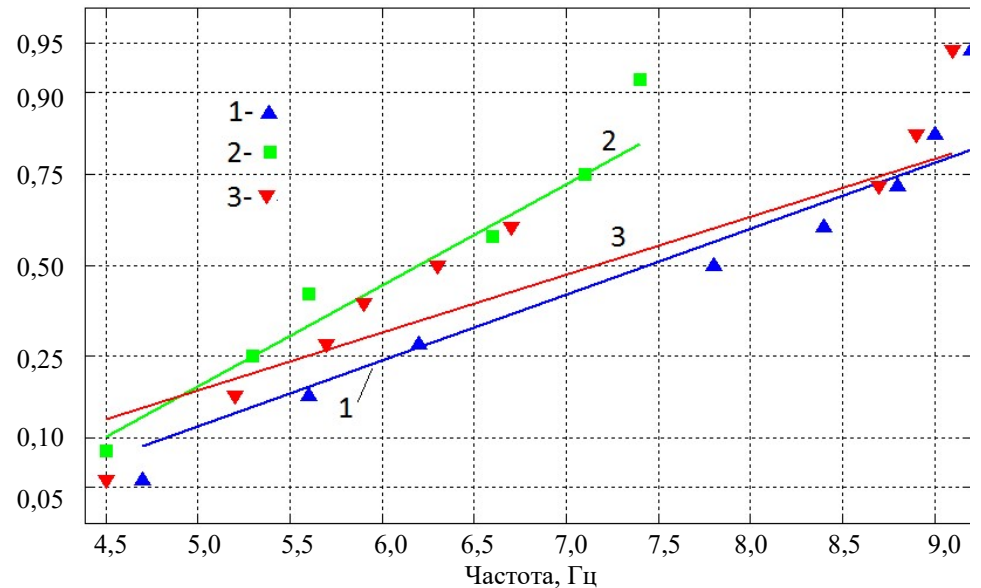


Рисунок 7 – Кумулятивные прямые нормального распределения частот колебательных мод: 1 – $P = 50,3$ Па; 2 – $P = 86,8$ Па; 3 – $P = 129$ Па

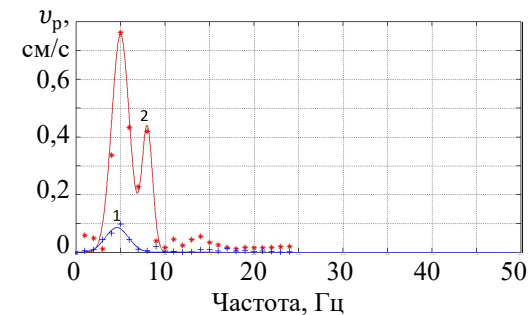
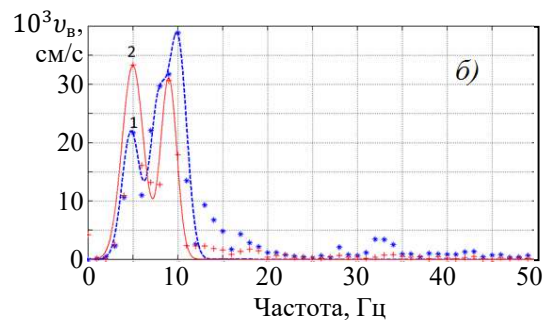
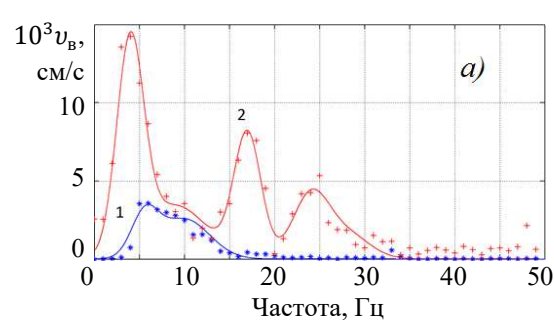


Рисунок 9 – Спектры вертикальной компоненты колебательной скорости нижней части обогатительной фабрики: *a)* от СВВ; *б)* от УВВ. Эксперимент: «*» - взрыв наружного заряда взрывчатого вещества массой 60 кг (1 – кривая аппроксимации), «+» - опытно-промышленный массовый взрыв (2 – кривая аппроксимации)

Рисунок 10 – Спектры радиальной компоненты колебательной скорости крыши обогатительной фабрики от опытно-промышленного массового взрыва. Эксперимент: «+» - воздействие СВВ (1 – кривая аппроксимации), «*» - воздействие УВВ (2 – кривая аппроксимации)

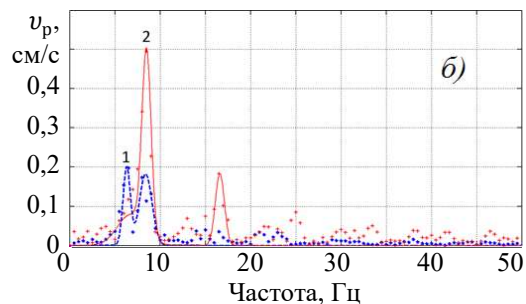
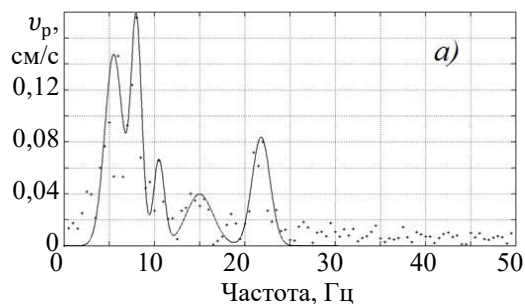


Рисунок 11 – Спектры радиальной компоненты колебательной скорости крыши обогатительной фабрики: *a)* от 2-го массового взрыва («*» - эксперимент, аппроксимация - сплошная кривая); *б)* от УВВ: массового взрыва («*» - эксперимент, «1» - аппроксимация); взрыва наружного заряда взрывчатого вещества («+» - эксперимент, «2» - аппроксимация)