

На правах рукописи

БУЛЬБАШЕВА Инна Александровна



**УПРАВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВОВ
НА ОПОРЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

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

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

Санкт-Петербург – 2019

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

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор:

Коршунов Геннадий Иванович

Официальные оппоненты:

Козырев Сергей Александрович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт КНЦ РАН, главный научный сотрудник – Заведующий лабораторией технологических процессов при добыче полезных ископаемых

Тюпин Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», кафедра прикладной геологии и горного дела, профессор

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

Защита диссертации состоится 17 декабря 2019 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 17 октября 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СИДОРОВ
Дмитрий Владимирович

Актуальность темы исследования. Применение буровзрывной технологии при отработке месторождений открытым способом способствует повышенной опасности эксплуатации инженерных сооружений, находящихся на прилегающих к горному предприятию территориях. Такие сооружения как воздушные линии электропередачи, обеспечивающие электроэнергией горные предприятия, зачастую проходят в непосредственной близости от фронта добычных работ или находятся внутри карьера и опираются на массив горных пород с различными прочностными и деформационными характеристиками, подвергаясь регулярному воздействию сейсмозрывных волн от массовых взрывов. Перенос участка трассы линии электропередачи на безопасное расстояние от фронта ведения взрывных работ сопряжен с финансовыми затратами, что является сложно реализуемой задачей для предприятия.

Закрепление в грунте конструкций линейных охраняемых объектов (опор линий электропередачи) не рассчитано на многократно повторяющееся воздействие сейсмозрывных волн от массовых взрывов. Сейсмозрывное воздействие (СВВ) приводит к возбуждению колебаний конструкции, появлению и накоплению остаточных деформаций и может привести к потере устойчивости, вследствие чего на горных предприятиях регулярно проводится выправка опор линий электропередачи в вертикальное положение.

Стоит отметить, что падения опор имеют тяжелые последствия, обусловленные остановкой технологических процессов на горных предприятиях, финансовыми и организационными затратами на восстановление.

Проблемой снижения опасного воздействия промышленных взрывов на инженерные сооружения занимались такие ученые, как М.А. Садовский, Е.И. Шемякин, В.В. Адушкин, Н.В. Мельников, М.Г. Менжулин, Б.Н.Кутузов, С.А. Козырев, Г.П. Парамонов, А.П. Господариков, С.В. Цирель, В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин, М.Г. Егоров, В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов, В.И. Куликов, Р.А. Гильманов, А.Н. Холодилов, В.Б. Вильчинский и др.

Вместе с тем существующие методы оценки СВВ не учитывают конструктивных особенностей сооружений различных типов и в основном применимы к зданиям массового строительства. Определение диапазона допустимых скоростей колебаний в массиве горных пород в основании опор линий электропередачи, основанном только на учете появления трещинообразования в материале конструкции, не может в полной мере служить критерием сейсмической взрывобезопасности сооружения. Благодаря развитию современной вычислительной техники, более

эффективными являются динамические методы расчета реакции системы «массив горных пород - сооружение» с учетом влияния работы массива горных пород в основании и позволяющие наиболее обоснованно подойти к управлению параметрами буровзрывных работ на устойчивость сооружения.

Таким образом, оценка СВВ на опоры линий электропередачи с детальным динамическим расчетом системы «массив горных пород – опора ЛЭП» на действие сейсмических сил от массовых взрывов, оценка реакции опоры на СВВ различных параметров с учетом физико-механических свойств массива горных пород в основании, выявление зависимостей накопления остаточных деформаций при многократном воздействии массового взрыва и расчет сейсмобезопасных параметров взрывных работ, позволяющих управлять СВВ на устойчивость сооружения, является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы. Управление параметрами буровзрывных работ на устойчивость системы «массив горных пород – опора ЛЭП» для эффективного производства взрывных работ на карьерах в зоне линейных охраняемых объектов.

Идея работы. Устойчивость системы «массив горных пород – опора ЛЭП» обеспечивается за счет минимизации накопления остаточных деформаций и снижения максимальной амплитуды скорости колебаний, на основе выбора количества групп замедлений и интервала замедления при массовых взрывах на карьерах.

Основные задачи исследований:

1. Выполнить анализ существующих методов оценки воздействия сейсмозврывных волн на здания и сооружения при производстве взрывных работ на карьерах.

2. Выявить зависимости параметров динамической реакции системы «массив горных пород – опора ЛЭП» от параметров буровзрывных работ на основе численного моделирования СВВ.

3. Разработать методику оценки СВВ на опоры воздушных линий электропередачи.

4. Разработать рекомендации по выбору параметров буровзрывных работ, позволяющих управлять сейсмическим воздействием взрывов на опоры линий электропередачи для эффективного производства взрывных работ на карьерах в зоне линейных охраняемых объектов.

Научная новизна:

- предложен методический подход к прогнозированию устойчивости опор линий электропередачи при воздействии

сейсмозрывных волн на основе учета накопления остаточных деформаций системы «массив горных пород – опора ЛЭП»;

- установлены зависимости максимальной амплитуды отклонения опоры и остаточных деформаций системы «массив горных пород - опора ЛЭП» от количества ступеней и интервала замедления при короткозамедленном взрывании на карьерах;

- установлены зависимости частот и скоростей вынужденных колебаний системы «массив горных пород – опора ЛЭП» от модуля деформации породного массива при ведении взрывных работ на карьерах.

Основные защищаемые положения:

1. Прогноз устойчивости системы «массив горных пород – опора ЛЭП» при производстве взрывных работ на карьерах должен проводиться с учетом механических характеристик горных пород в основании и максимального значения отклонения опоры, приводящего к опрокидыванию.

2. Определяющими факторами, влияющими на динамическую реакцию системы «массив горных пород - опора ЛЭП» при действии сейсмозрывных нагрузок, являются деформационные характеристики основания и количество ступеней замедления с учетом амплитуды сейсмозрывной волны при суперпозиции волн различных групп замедлений.

3. Снижение максимальной скорости колебаний опоры и динамической нагрузки на систему «массив горных пород - опора ЛЭП» достигается применением интервалов замедлений $\tau_{\text{зам}} \geq 42$ мс, количества групп замедлений $N \geq 20$ при минимизации накопления остаточных деформаций в условиях сейсмического воздействия промышленных взрывов на карьерах.

Теоретическая и практическая значимость:

- Разработана методика оценки СВВ промышленных взрывов на опоры линий электропередачи, основанная на численном моделировании динамической реакции системы «массив горных пород - опора ЛЭП».

- Разработаны рекомендации по управлению сейсмическим воздействием взрывов на опоры линий электропередачи при открытой разработке месторождений и обеспечении необходимого качества дробления горной породы.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использован комплексный метод исследований: анализ и обобщение данных по методам оценки СВВ на охраняемые объекты различных типов; анализ инструментальных наблюдений за сейсмическим воздействием взрывов на опоры ЛЭП на карьере карбонатного сырья,

лабораторные исследования проб дисперсных грунтов основания опор; статистическая обработка результатов; численные расчеты критического угла отклонения опоры, установленной на дисперсном и скальном основаниях; численный анализ динамической реакции опоры при нагружении идеализированными сейсмограммами при различных параметрах буровзрывных работ (метод конечных элементов).

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается: применением средств численного моделирования, использованием современных технических средств и регистрирующей аппаратуры при проведении сейсмометров, удовлетворительной сходимостью результатов натуральных наблюдений и результатов моделирования динамической реакции опоры ЛЭП при воздействии сейсмозрывных волн.

Апробация работы. Основные положения исследований были представлены на научных конкурсах и конференциях в 2016-2019 гг.: международном форуме-конкурсе «Проблемы недропользования» (Горный университет, Санкт-Петербург, 2018, 2019 г. (Диплом I степени, 2019 г.), Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2019», (НИТУ МИСиС, г. Москва, 2019 г.), III и IV международные научно-практические конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в 21 веке» (Горный университет, Санкт-Петербург, 2016, 2018 г.), Международная научно-практическая конференция, посвященная 110-летию горного факультета «Горное дело в 21 веке: технологии, наука, образование» (Горный университет, Санкт-Петербург, 2017 г.), Международная конференция молодых ученых на базе Фрайбергской горной академии (Фрайберг, Германия, 2016 г.), Международная научно-практическая конференция «Современные научно-практические решения и подходы» (Москва, 2016 г).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследований, анализе и обобщении существующих методов оценки СВВ на охраняемые объекты различных типов, проведении натуральных исследований СВВ на охраняемые объекты Афанасьевского карьера карбонатного сырья, проведении лабораторных исследований проб грунтов в основании опор линий электропередачи Афанасьевского карьера карбонатного сырья, разработке расчетных численных моделей, разработке рекомендации по выбору параметров буровзрывных работ для управления СВВ на охраняемые объекты.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы содержатся в 9 опубликованных работах, в том числе 3 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 – в издании, индексированном международной базой данных Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 180 страницах машинописного текста, содержит 97 рисунков, 33 таблицы, список литературы из 144 наименований, 3 приложения на 12 страницах.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д.т.н. проф. Коршунову Г.И. за постоянное внимание и помощь в подготовке работы, а также главному инженеру ООО «Экспотехвзрыв» к.т.н. Гильманову Р.А., руководству Афанасьевского карьера, сотрудникам кафедры безопасности производств за ценные научные рекомендации по работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, ее актуальность, цель, идея, задачи, научная новизна, сформулированы защищаемые положения и практическая значимость.

В первой главе выполнен обзор и анализ существующих методов оценки СВВ на охраняемые объекты; рассмотрены методы снижения сейсмического воздействия массовых взрывов на охраняемые объекты; произведен анализ и обобщение результатов натуральных исследований воздействия сейсмозрывных волн на охраняемые объекты Афанасьевского месторождения карбонатного сырья, определены задачи исследования.

Во второй главе приведены лабораторные исследования физико-механических свойств пород в основании опор ЛЭП, результаты измерения деформаций опор в натуральных условиях, результаты натуральных исследований реакции промежуточной железобетонной опоры ЛЭП при СВВ в условиях Афанасьевского месторождения карбонатного сырья.

В третьей главе выполнено исследование влияния сейсмозрывных волн с различными параметрами буровзрывных работ на реакцию системы «массив горных пород - опора ЛЭП» в динамической постановке на основе численного моделирования.

В четвертой главе проведена апробация разработанной методики оценки СВВ на стальные опоры башенного типа, а также даны рекомендации по выбору параметров буровзрывных работ для управления СВВ на линейные охраняемые объекты.

В заключении представлены основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения исследований.

Основные результаты исследования отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Прогноз устойчивости системы «массив горных пород – опора ЛЭП» при производстве взрывных работ на карьерах должен проводиться с учетом механических характеристик горных пород в основании и максимального значения отклонения опоры, приводящего к опрокидыванию.

Измерения пространственного положения промежуточных опор трассы ЛЭП вблизи фронта ведения взрывных работ на ряде месторождений карбонатного сырья показали наличие значительных отклонений опор. Величины отклонений промежуточных опор секции ВЛ-110 в пределах горного отвода Афанасьевского карьера (Московская область) находятся в диапазоне 230-600 мм. Следовательно, при многократно повторяющемся СВВ на систему «массив горных пород - опора ЛЭП» появляются остаточные деформации в виде отклонений стоек опор, происходит их накопление, что может привести к потере устойчивости.

Поскольку промежуточные железобетонные опоры удерживаются в проектном положении за счет реакций грунта по боковой поверхности, то устойчивость в значительной степени определяется механическими характеристиками основания. Условие закрепления стойки по деформациям согласно СП 22.13330.2011 имеет вид:

$$\beta_0 \leq \beta, \quad (1)$$

где β – нормативный угол отклонения стойки опоры в закреплении, равный 0,01 радиан; β_0 – угол поворота стойки в заделке.

Величина нормативного угла отклонения $\beta = 0,01$ радиан является универсальной для одностоечных железобетонных опор вне зависимости от их геометрических размеров и характеристик пород в основании. В связи с этим, прогноз устойчивости системы «массив горных пород – опора ЛЭП» с учетом геометрии опоры и характеристик основания при производстве взрывных работ на карьерах предлагается осуществлять на основе расчета критерия потери устойчивости в численной постановке методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе SimuliaAbaqus. Механическое поведение массива описывалось упругопластической моделью Кулона-Мора, механическое поведение материалов конструкции – моделью линейно-деформируемого тела. Расчет был проведен для условий опирания на разные типы оснований: суглинок и известняк. Механические свойства пород определены в ходе лабораторных исследований: суглинок –

плотность $\rho=1900 \text{ кг/м}^3$, коэффициент поперечной деформации $\nu=0.35$, модуль деформации $E=16 \text{ МПа}$, угол внутреннего трения $\varphi=23.4^\circ$, сцепление $c=0.016 \text{ МПа}$; известняк – плотность $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$, коэффициент поперечной деформации $\nu=0.3$, модуль деформации $E=50 \text{ МПа}$, угол внутреннего трения $\varphi=30^\circ$, сцепление $c=22 \text{ МПа}$.

Расчет критерия потери устойчивости опоры реализовывался в статической постановке при моделировании задачи о работе системы «массив горных пород – опора ЛЭП» с различными начальными углами отклонения от вертикального положения. В результате поэтапного задания начального угла отклонения опоры вертикальные статические нагрузки начинают действовать с эксцентриситетом, что приводит к увеличению начального отклонения. Этот процесс сопровождается формированием зоны интенсивного развития пластических деформаций в окрестности контакта опоры и массива. Конечным результатом является зависимость между величиной начального отклонения опоры от вертикального положения (P) и приращением этого отклонения (K) соответствующего моменту формирования потери устойчивости основания. Для условий опирания на суглинки были получены следующие результаты: при величине начального отклонения опоры $P = 460 \text{ мм}$ ($1,18^\circ$) действие статических вертикальных нагрузок приводит к приращению этого отклонения до $K = 2000 \text{ мм}$ ($5,13^\circ$), что соответствует моменту образования пластических деформаций в грунте основания (рисунок 1,2).

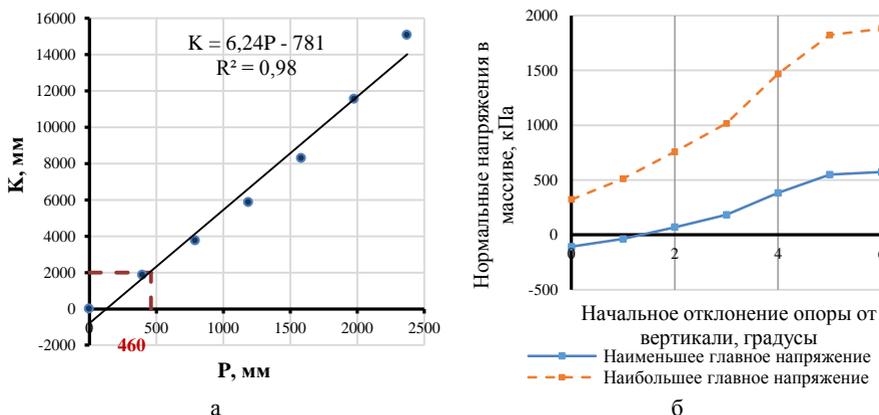
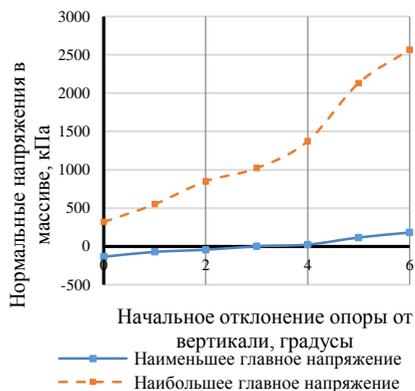
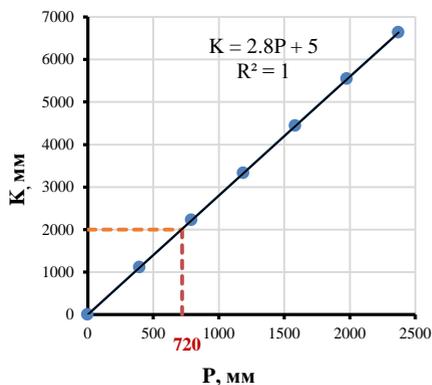


Рисунок 1 – График зависимости приращения отклонения опоры K от ее начального отклонения P для случая опирания на суглинки (а) и напряжения в массиве при различных значениях угла отклонения опоры (б)



а б
Рисунок 3 – График зависимости приращения отклонения опоры K от ее начального отклонения P для случая опирания на известняк (а) и напряжения в массиве при различных значениях угла отклонения опоры (б)

Таким образом, критерий потери устойчивости, определяемый из условия появления пластических деформаций в массиве по боковой поверхности опоры в результате ее крена, ограничивает область начальных отклонений опоры величиной 460 мм.

Для условий закрепления опоры в известняковом массиве (рисунок 3) опора ЛЭП накапливает отклонения от вертикали величиной $K = 2000$ мм при величине начального отклонения $P = 720$ мм ($1,82^\circ$).

Таким образом, изучение процесса потери устойчивости системы «массив горных пород – опора ЛЭП», происходящего вследствие появления критических углов отклонения опоры и обусловленного развитием пластических деформаций в основании с учетом его механических характеристик, позволяет задаться максимальным значением отклонения опоры для последующего прогноза накопления остаточных деформаций при СВВ.

2. Определяющими факторами, влияющими на динамическую реакцию системы «массив горных пород - опора ЛЭП» при действии сейсмозрывных нагрузок, являются деформационные характеристики основания и количество ступеней замедления с учетом амплитуды сейсмозрывной волны при суперпозиции волн различных групп замедлений.

В процессе натуральных исследований СВВ на охраняемые объекты Афанасьевского карьера карбонатного сырья были проведены 16 массовых взрывов на северном и юго-западном участках бортов карьера на уступах доломитов и известняков. Эпицентральные расстояния составили $R=(110\div 3730)$ м до охраняемых объектов (автомобильный мост, кузнечный цех, опоры ЛЭП, садовые участки). В качестве сейсмоприемников использовались магнитоэлектрические датчики маятникового типа СМЗ-КВ и трехосевые сейсмоприемники Minimate Pro4 (Instantel), предварительно прошедшие проверку.

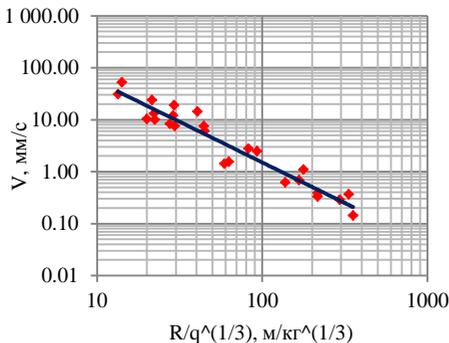


Рисунок 4 – Зависимость максимальных скоростей колебаний грунта от приведенного эпицентрального расстояния при взрывах на карьере

Анализ натурных измерений показал, что при эпицентральных расстояниях до охраняемых объектов $R > 1000$ м амплитуда горизонтальной компоненты сейсмозврывной волны превышает значения вертикальной компоненты в 1,3-2,5 раза; при $R \leq 1000$ м разница составляет 7-10 раз, т.е. амплитуда горизонтальной

скорости колебаний грунта является преобладающей при взрывах на карьере.

В результате проведенных измерений интенсивности СВВ для карьера карбонатного сырья был определен сейсмический эффект проводимых взрывов на основе зависимости скорости смещения грунта от приведенного эпицентрального расстояния (рисунок 4). Данные обработаны с использованием стандартных программ Excel и аппроксимированы уравнением вида:

$$V = 2026 \left(\frac{\sqrt[3]{q}}{R} \right)^{1.5}, (R^2 = 0,93), \quad (2)$$

Исследование влияния СВВ на динамическую реакцию системы «массив горных пород - опора ЛЭП» было проведено с применением численного моделирования МКЭ в динамической постановке. Массив горных пород описывался моделью однородной, изотропной упругопластической среды Кулона-Мора, отражающей поведение

массива в дальней зоне взрыва. Физико-механические свойства известняков и суглинков соответствуют модели для расчета критерия потери устойчивости опоры в статической постановке. При распространении сейсмозврывной волны по массиву учет затухания осуществлялся на основе метода Рэлея. На границах расчетной области массива горных пород были заданы поглощающие граничные условия. Расчетная схема приведена на рисунке 5.

Сравнение результатов натуральных измерений реакции железобетонной опоры ЛЭП при СВВ и результатов численного расчета реакции системы «массив горных пород – опора ЛЭП» при использовании натуральных данных, показало хорошую сходимость. Таким образом, модель была откалибрована, что позволило проводить динамические расчеты максимальной амплитуды отклонения, скорости, частоты вынужденных колебаний и остаточных деформаций стойки опоры при СВВ на систему «массив горных пород – опора ЛЭП».

Поскольку основная энергия сейсмозврывной волны концентрируется в полусинусоиде с максимальной скоростью, расчет вариантов динамического воздействия на систему «массив горных пород – опора ЛЭП» был реализован на основе идеализированных сейсмограмм при инициировании одной группы зарядов в массовом взрыве, которые можно описать следующим выражением:

$$V = V_0 e^{-d \frac{|t|}{T}} \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t, \quad (3)$$

где T – характерный период волны, с; d – логарифмический декремент затухания; V_0 – максимальное значение скорости, мм/с.

Исходные параметры идеализированных сейсмограмм были приняты по результатам анализа и обобщения натуральных измерений СВВ для Афанасьевского карьера: характерный период волны $T=30$ мс, декремент затухания $d=2$. Максимальные значения скоростей колебаний были приняты из условий районирования карьерного поля и выделения основных зон ведения взрывных работ относительно линии электропередачи: ближняя зона $V_0 \geq 30$ мм/с и дальняя зона $V_0 = (4 \div 8)$ мм/с.

Численный анализ влияния количества групп замедлений с учетом суперпозиции идеализированных сейсмограмм V_{max} от инициирования серии из двух ($N=2$), десяти ($N=10$) и ста ($N=100$) групп зарядов с интервалом замедления $\tau_{зам}=25$ мс, показал, что величина остаточных деформаций опоры меняется пропорционально количеству

групп замедлений и зависит от амплитуды сейсмозврывной волны. При этом максимальная амплитуда отклонения опоры при колебаниях снижается в случае воздействия идеализированной сейсмограммы $N=100$ (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты моделирования реакции опоры на известняковом основании

№	Тип идеализированной сейсмограммы	Максимальная амплитуда отклонения верха стойки опоры, мм	Остаточные деформации верха стойки опоры, мм
Дальняя зона ведения взрывных работ			
1	1 группа зарядов, $V_{\max} = 7,51$ мм/с	0,070	0,025
2	2 группы зарядов, $V_{\max} = 8,2$ мм/с, $\tau_{\text{зам}}=25$ мс	0,143	0,050
3	10 групп зарядов, $V_{\max} = 8,91$ мм/с, $\tau_{\text{зам}}= 25$ мс	0,674	0,250
4	100 групп зарядов $V_{\max} = 8,91$ мм/с, $\tau_{\text{зам}}= 25$ мс	3,634	2,554
Ближняя зона ведения взрывных работ			
5	1 группа зарядов, $V_{\max} = 35$ мм/с	0,334	0,112
6	2 группы зарядов, $V_{\max} = 38,29$ мм/с, $\tau_{\text{зам}}= 25$ мс	0,671	0,238
7	10 групп зарядов, $V_{\max} = 41,58$ мм/с, $\tau_{\text{зам}}= 25$ мс	3,246	1,116
8	100 групп зарядов, $V_{\max} = 41,58$ мм/с, $\tau_{\text{зам}}= 25$ мс	17,39	11,16

Анализ влияния деформационно-прочностных характеристик пород в основании на реакцию опоры при опирании на суглинок и известняк и воздействии идеализированной сейсмограммы от инициирования одной группы зарядов $V_{\max} = 7,51$ мм/с показал, что величины максимальной амплитуды отклонения опоры при колебаниях меняются в диапазоне $(0,065 \div 0,07)$ мм, величины остаточных деформаций составляют $(0,025 \div 0,03)$ мм, при этом продолжительность и период колебаний опоры на суглинистом основании в 1,5 раза больше, чем на известняковом.

Представление массива в виде однородной упругой изотропной среды, свойства которой описываются коэффициентом поперечной деформации μ и модулем общей деформации E , позволило оценить влияние изменения E на параметры колебаний опоры в диапазоне: 1 МПа, 3,5 МПа (глинистый массив), 5 МПа, 25 МПа, 50 МПа (скальный массив), 100 МПа, 1000 МПа при воздействии расчетной идеализированной сейсмограммы $N=100$, $V_{\max} = 8,91$ мм/с. В результате расчетов установлено, что при закреплении опоры в массиве $E \leq 5$ МПа увеличение средней частоты и скорости колебаний опоры наиболее выражено (рисунок 6).

Таким образом, при проведении анализа динамической реакции системы «массив горных пород - опора ЛЭП» на действие сейсмических сил от массовых взрывов с учетом деформационных характеристик основания, были получены величины остаточных деформаций опоры, позволяющие прогнозировать количество циклов взрывного воздействия с учетом количества ступеней замедления, амплитуды сейсмозрывной волны при суперпозиции волн, приводящего к накоплению критического отклонения.

3. Снижение максимальной скорости колебаний опоры и динамической нагрузки на систему «массив горных пород - опора ЛЭП» достигается применением интервалов замедлений $\tau_{зам} \geq 42$ мс, количества групп замедлений $N \geq 20$ при минимизации накопления остаточных деформаций в условиях сейсмического воздействия промышленных взрывов на карьерах.

Одним из способов управления сейсмическим воздействием взрывов на охраняемые объекты является правильный выбор интервала замедления между различными группами зарядов массового взрыва. В целях изучения влияния величины интервала замедления на интенсивность колебаний системы «массив горных пород – опора ЛЭП» были проведены численные расчеты, при которых динамическая нагрузка задавалась в виде идеализированной сейсмограммы $N=100$ с интервалами замедлений $\tau_{зам}=25$ мс, 42 мс, 67 мс и 109 мс.

Увеличение интервала замедления при проведении масштабных взрывов $N=100$, способствует снижению сейсмического эффекта на массив горных пород в основании опоры и интенсивности колебаний опоры. Установлено, что при увеличении интервала замедления до 42 мс максимальная амплитуда отклонения опоры при колебаниях уменьшается в 1,3 раза (рисунок 7), при этом величина остаточных деформаций верха стойки опоры составляет 2,5 мм.

Анализ влияния величины интервала замедления на динамическую реакцию опоры показал, что применение короткозамедленного взрывания с интервалами замедлений $\tau_{зам} \geq 42$ мс является рациональным с точки зрения воздействия на охраняемые объекты подобного типа, поскольку в этом случае сейсмозрывные волны, генерируемые разными группами замедлений, не накладываются друг на друга и величина максимальной скорости колебаний опоры снижается в 2,2 раза по сравнению с $\tau_{зам}=25$ мс (рисунок 8), раскочка по скорости снижается в 1,4 раза. В связи с этим, раскочку опор ЛЭП по скорости необходимо учитывать при значениях интервалов замедления $\tau_{зам}=(20\div 30)$ мс.

При оценке влияния количества групп замедлений на скорость колебаний опоры ЛЭП и массива в основании было установлено, что система «массив горных пород – опора ЛЭП» испытывает наибольшую динамическую нагрузку при количестве групп замедлений $N=(10\div 20)$ и $\tau_{\text{зам}}=25$ мс (рисунок 9). Увеличение количества групп замедлений способствует снижению скорости колебаний опоры и массива в основании.

В рамках натуральных исследований влияния СВВ на параметры колебаний опор в условиях Афанасьевского карьера были проведены 5 массовых взрывов на северном и юго-западном участках бортов карьера при $R=(400\div 800)$ м до опор. Регистрация колебаний опор проводилась путем установки сейсморегистратора «ZETLAB 048» на опоре ($H=1,2$ м от поверхности земли). При оценке влияния количества групп замедлений на параметры колебаний железобетонной опоры было выделено два массовых взрыва на уступе мергелей со сходными параметрами буровзрывных работ (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры колебаний опоры ЛЭП при массовых взрывах

	Массовый взрыв 25.11.15	Массовый взрыв 03.10.16
Максимальная масса заряда в ступени, кг	492	468
Количество групп замедлений	2	10
Расстояние от блока до опоры ЛЭП, м	800	1000
Максимальная амплитуда отклонения опоры на высоте $H=1,2$ м, мм	0,05	0,31
Среднее отклонение на ступень замедления, мм	0,025	0,031
Максимальная скорость колебаний опоры, мм/с	0,95	2,6

Результаты проведенных натуральных измерений подтвердили данные численного анализа: установлено, что величина отклонения пропорциональна количеству групп замедлений. При увеличении количества групп замедлений динамическая нагрузка на опору, обусловленная увеличением скорости колебаний, возрастает.

Анализ применяемых интервалов замедления при взрывах на карьере показал, что при применении порядных схем взрывания с интервалами замедления $\tau_{\text{зам}}=(42\div 67)$ мс максимальная масса заряда в ступени составляет 300-1500 кг, при этом на расстояниях $R=(300\div 400)$ м до охраняемого объекта формируются сейсмозврывные волны скоростью $V=(6\div 10)$ мм/с. Применение схем взрывания с замедлениями в ряду $\tau_{\text{зам}}=17$ мс способствует снижению максимальной массы заряда в ступени в среднем до 150-450 кг, при этом скорость колебаний снижается в 2-3 раза до значений $V=(1,7\div 5)$ мм/с. Таким образом, при ведении взрывных работ в дальней зоне относительно линии

электропередачи возможно применение порядных схем с интервалами замедления $\tau_{\text{зам}} \geq 42$ мс, однако при приближении фронта взрывных работ к линейному охраняемому объекту рекомендуется переходить на поскважинное инициирование зарядов за счет применения замедлений в ряду.

Управление сейсмическим действием промышленных взрывов на охраняемые объекты может быть достигнуто управлением параметрами буровзрывных работ и изменением технологических условий ведения взрывных работ (изменение направления инициирования, ориентации взрываемого блока относительно охраняемых объектов) при обеспечении требуемого качества дробления. Выбор элементов управления должен базироваться на детальном анализе динамической реакции охраняемого объекта.

В качестве апробации разработанной методики оценки СВВ на опоры линий электропередачи были реализованы численные расчеты динамической реакции стальной опоры башенного типа ПП110-6 в системе «массив горных пород – опора ЛЭП». В результате установлено, что колебания стальной опоры характеризуются быстрым затуханием и меньшими амплитудами раскачки по скорости по сравнению с железобетонной опорой стержневого типа (рисунок 10). При колебаниях от действия сейсмозврывных нагрузок интенсивностью от 7,5 мм/с происходит потеря местной устойчивости стержневых уголковых элементов системы решетки в узле сопряжения наклонных и вертикальных поясов, что может привести к разрушению по второй группе предельных состояний (рисунок 11).

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что при ведении взрывных работ на карьерах годовой производительностью до 2,5 млн.т сырья управление СВВ на опоры ЛЭП достигается детализацией интервалов замедления при различных схемах взрывания, способствующих снижению скорости колебаний опоры, раскачки по скорости, что особенно актуально с внедрением электронных систем инициирования зарядов. При реализации масштабной добычи сырья элементом управления является увеличение количества групп замедления, позволяющих снизить динамическую нагрузку на систему «массив горных пород – опора ЛЭП».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлено решение актуальной научно-технической задачи по управлению сейсмическим воздействием промышленных взрывов на опоры линий электропередачи.

Основные научные и практические результаты:

1. Рассмотрено состояние вопроса оценки СВВ на охраняемые объекты различных типов. Установлено, что на современном этапе отсутствует обоснованная методика, позволяющая прогнозировать устойчивость опор линий электропередачи, закрепленных в массиве горных пород при СВВ, а также обоснованно подходить к выбору параметров буровзрывных работ, позволяющих управлять СВВ на устойчивость линейных охраняемых объектов.

2. Установлено, что определяющими факторами, влияющими на динамическую реакцию системы «массив горных пород – опора ЛЭП» при СВВ являются: деформационные характеристики горных пород в основании опор, количество групп замедлений массового взрыва, амплитуда сейсмозврывной волны при суперпозиции волн различных групп замедлений, величина интервала замедления.

3. По результатам численных расчетов установлено, что средняя частота и скорость вынужденных колебаний опоры в системе «массив горных пород – опора ЛЭП» зависят от величины модуля деформации массива в основании. При закреплении опоры ЛЭП в массиве с малыми значениями модуля деформации $E \leq 5$ МПа увеличение средней частоты и скорости колебаний опоры наиболее выражено.

4. По результатам натурных исследований и численного моделирования выявлено, что величина остаточных деформаций опоры в системе «массив горных пород – опора ЛЭП» линейно пропорциональна количеству групп замедлений массового взрыва.

5. Установлено, что при количестве групп замедлений в массовом взрыве $N = (10 \div 20)$ и интервале замедления $\tau_{\text{зам}} \geq 25$ мс система «массив горных пород – опора ЛЭП» испытывают наибольшую динамическую нагрузку, увеличение количества групп замедлений приводит к снижению динамической нагрузки на сооружение и массив в его основании.

6. Установлено, что снижение СВВ на опоры линий электропередачи при поскважинном взрывании зарядов в схемах КЗВ обеспечивается за счет выбора интервалов замедления $\tau_{\text{зам}} \geq 42$ мс, обеспечивающих снижение максимальной амплитуды скорости колебаний опоры в 2,2 раза, раскачки опоры по скорости в 1,4 раза по сравнению с меньшими величинами интервалов замедлений.

7. Разработана методика оценки СВВ на опоры линий электропередачи, позволяющая управлять сейсмическим воздействием взрывов на устойчивость системы «массив горных пород – опора ЛЭП» на основе прогноза накопления остаточных деформаций до критической величины при ведении взрывных работ на карьерах.

8. Проведена апробация разработанной методики оценки СВВ на систему «массив горных пород – опора ЛЭП» применительно к стальной опоре башенного типа. Установлено, что колебания от действия сейсмозрывных нагрузок интенсивностью от 7,5 мм/с приводят к потере местной устойчивости стержневых уголковых элементов системы решетки в узле сопряжения наклонных и вертикальных поясов, что может привести к разрушению по второй группе предельных состояний.

9. Разработаны рекомендации по управлению параметрами буровзрывных работ, позволяющие снизить интенсивность сейсмического воздействия взрывов на опоры линий электропередачи, закрепленные в массиве горных пород, с обеспечением требуемого качества дробления.

Публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки:

1. Коршунов, Г.И. Исследование характера колебаний и оценка устойчивости опор ЛЭП 110 кВ с учетом фактических характеристик грунта основания при сейсмозрывном воздействии / Г.И. Коршунов, П.И. Афанасьев, **И.А. Бульбашева** // Взрывное дело. – 2017. – № 118-75. – С. 197-226.

2. Коршунов, Г.И. Сравнительный анализ методик по сейсмической безопасности охраняемых объектов (опоры ЛЭП) / Г.И. Коршунов, **И.А. Бульбашева**, П.И. Афанасьев // Горный информационно-аналитический бюллетень: науч.-техн. журн. – 2017. – Т.2. – № 4; Спец. Вып. 5-2. – С. 80-88.

3. Гильманов, Р.А. Численный анализ динамической реакции железобетонной опоры ЛЭП на действие сейсмозрывных нагрузок / Р.А. Гильманов, Г.И. Коршунов, Н.А. Беляков, **И.А. Бульбашева** // Горный информационно-аналитический бюллетень: науч.-техн. журн. – 2019. – № 4; Спец. Вып. 5. – С. 3-15.

Публикации в международной базе цитирования Scopus:

4. Korshunov, G.I. Survey of seismic conditions of drilling and blasting operations near overhead electricity power lines [Электронный ресурс] / G.I. Korshunov, P.I. Afanasev, **I.A. Bulbasheva** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Mining and Exploration of Mineral Resources. – 2017. – Vol. 87 – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/5/052012>

5. Korshunov, G.I. Evaluation of stability of electric transmission concrete poles under the influence of blast-induced ground vibrations on the basis of numerical modeling [Электронный ресурс] / G.I. Korshunov, P.I. Afanasev, **I.A. Bulbasheva** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International science and technology conference "Earth science". – 2019. – Vol. 272 – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/272/2/022190>

В прочих изданиях:

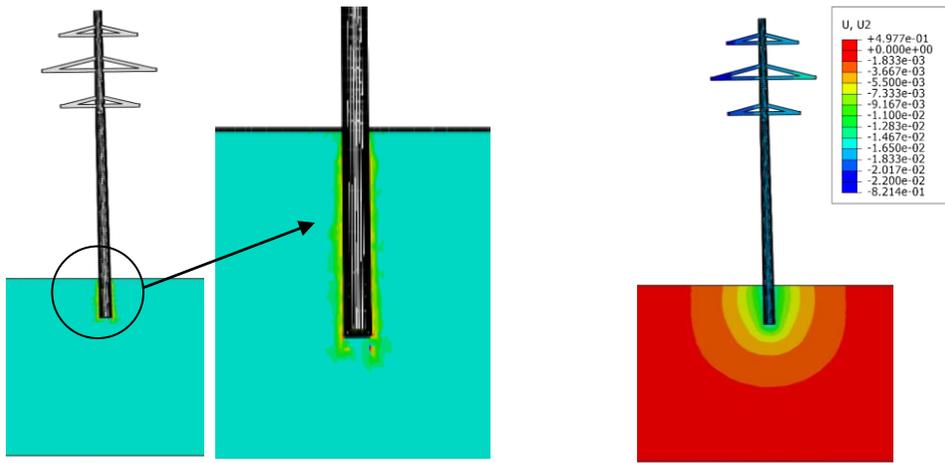
6. Коршунов, Г.И. Исследование сейсмического воздействия на линии электропередач при ведении взрывных работ / Г.И. Коршунов, **И.А. Бульбашева**, П.И. Афанасьев // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 4. – С. 39-43.

7. **Bulbasheva, I.A.** Investigation of seismic impact of blasting operations in Afanasyevsky open-cast of cement raw materials / I.A. Bulbasheva, P.I. Afanasev // Scientific reports on resource issues. Freiberg. – 2016. – Vol. 1. – P. 172-177.

8. Korshunov, G.I. On stability loss evaluation of transmission free-standing concrete poles / G.I. Korshunov, **I.A. Bulbasheva** // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers. CRC Press. Taylor&FrancisGroup, London. – 2018. – P. 67-75.

Патенты:

9. Полезная модель к патенту 176003 Российская Федерация, Экран для защиты зданий и сооружений от вибраций / Г.И. Коршунов, П.И. Афанасьев, В.Р. Алабьев, **И.А. Бульбашева**; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. - № 2017123713; заявл. 04.07.2017; опубл. 26.12.2017, Бюл. №36. – 7 с.



а

б

Рисунок 2 – Результаты моделирования статической работы системы «массив горных пород - опора ЛЭП» при опирании на суглинки и начальном отклонении от вертикали 1°: а) конфигурация зоны развития пластических деформаций; б) изохромы вертикальных перемещений в массиве

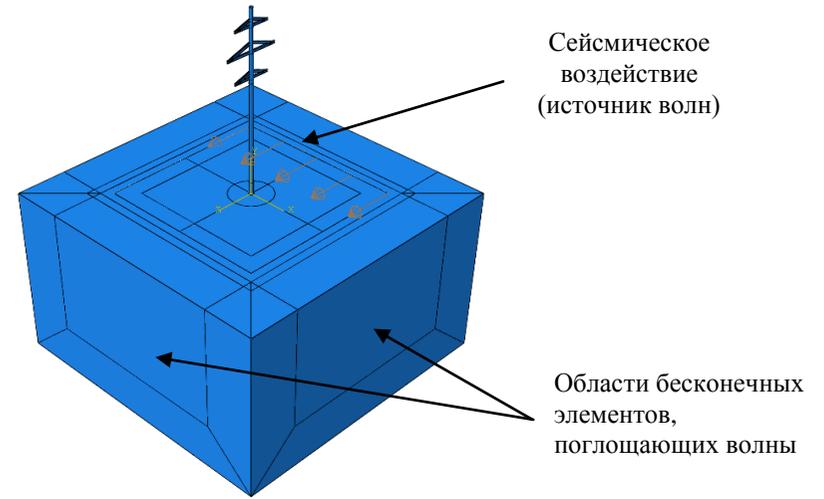
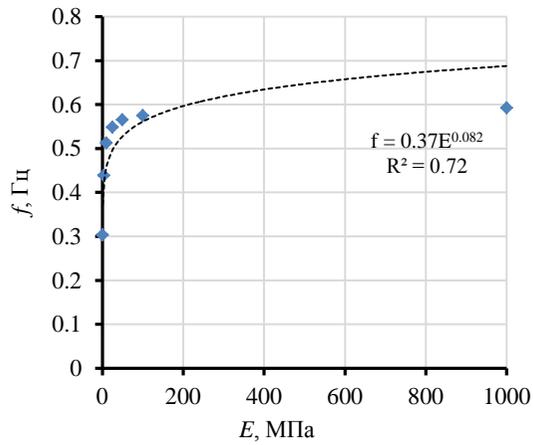
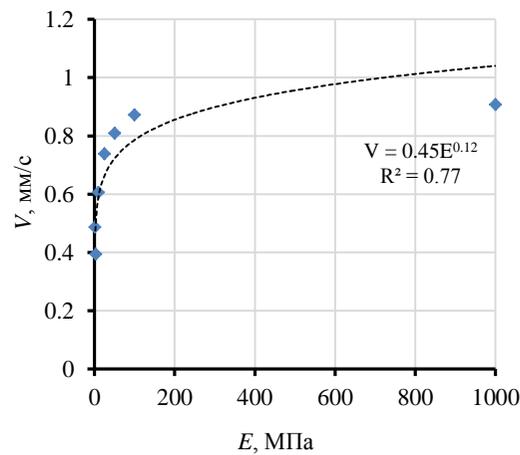


Рисунок 5 – Расчетная схема для моделирования задачи о работе системы «массив горных пород – опора ЛЭП» при сейсмозрывном воздействии



а



б

Рисунок 6 – Изменение средней частоты f (а) и средней скорости V колебаний опоры (б) при вариации модуля деформации E основания

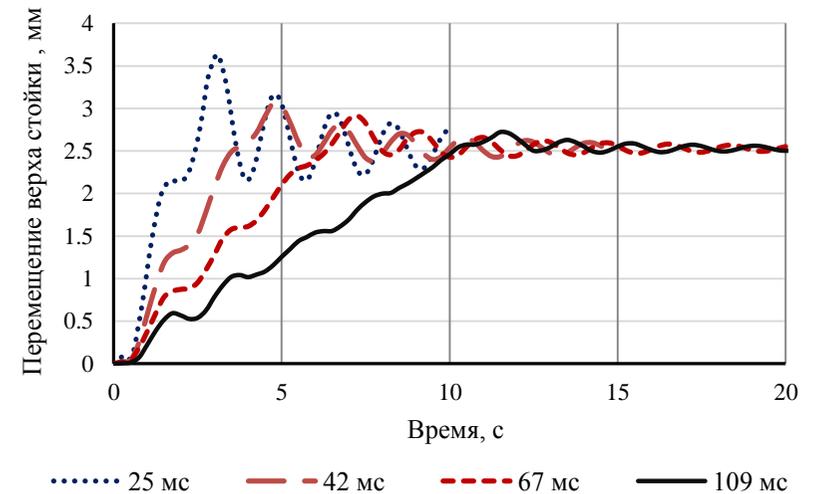


Рисунок 7 – Перемещение верха стойки опоры при воздействии идеализированной сейсмограммы N=100

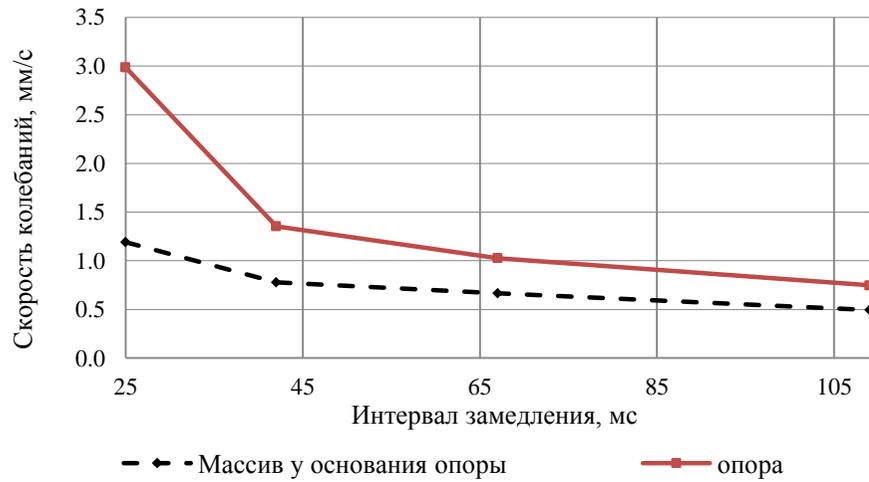


Рисунок 8 – Изменение скорости колебаний опоры и массива в основании при воздействии идеализированной сейсмограммы $N=100$ с различными интервалами замедлений

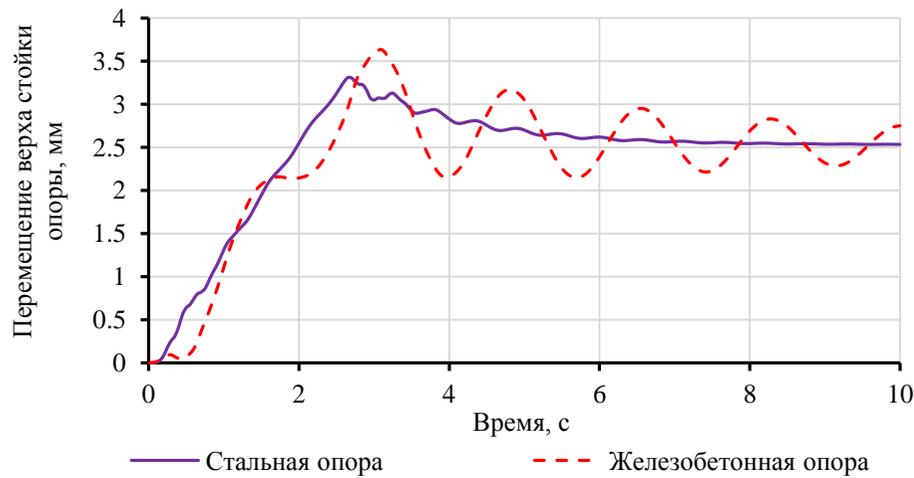


Рисунок 10 – Графики перемещения верха стойки железобетонной и стальной опор при воздействии идеализированной сейсмограммы $V_{max}=7,51$ мм/с, $N=100$

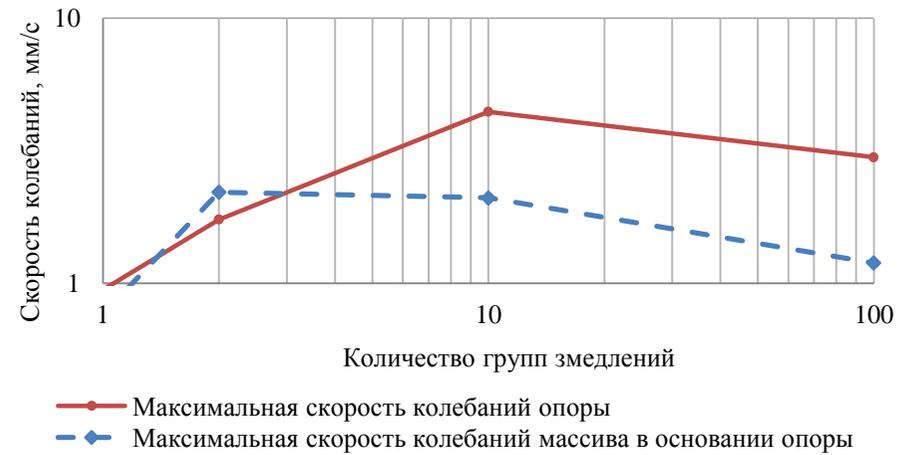


Рисунок 9 – Изменение скорости колебаний опоры и массива в основании при сейсмическом воздействии с различным количеством групп замедлений

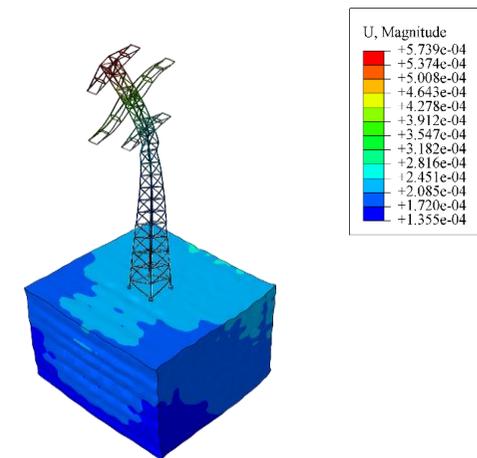


Рисунок 11 – Перемещения верха стойки стальной опоры при воздействии идеализированной сейсмограммы $V_{max}=38,29$ мм/с, $N=2$