

На правах рукописи

ВЫХОДЦЕВ Ярослав Николаевич



**Разработка математической модели воздействия
сейсмозрывной волны на массив горных пород, включающий
горизонтальную выработку**

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

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

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

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор

Господариков Александр Петрович

Официальные оппоненты:

Еременко Виталий Андреевич

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова» Российской академии наук, отдел освоения месторождений твердых полезных ископаемых на больших глубинах, ведущий научный сотрудник

Вильчинский Владислав Борисович

кандидат технических наук, ООО «Институт Гипроникель», заведующий горной лабораторией

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

Защита состоится 26 сентября 2018 г. в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.06 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1163.

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

Автореферат разослан 26 июля 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СИДОРОВ
Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Разработка рудных месторождений горными предприятиями ведётся открытым и подземным способами. Ведение буровзрывных работ тесно сопряжено с проблемой обеспечения безопасности отработки рудных месторождений, а именно: сохранение подземных сооружений.

Добыча апатит-нефелиновых руд на Объединенном Кировском руднике открытым способом, а именно с помощью проведения массовых взрывов, связана с выделением большого количества энергии, которая наряду с полезными формами работы взрыва (дробление породы) обуславливает образование сейсмозрывной волны. Перенос энергии в окружающую среду в форме сейсмозрывной волны, в той или иной степени, может привести к негативным последствиям.

При динамическом воздействии на массив горных пород подземного рудника, включающий горизонтальную горную выработку, возникают значительные деформации и напряжения, влияющие на безопасность и устойчивость выработки.

Сейсмическое воздействие буровзрывных работ на охраняемые объекты исследовалось в работах учёных: В.В. Адушкина, А.Е. Азарковича, Е.Л. Булдакова, В.Б. Вильчинского, Н.Л. Горохова, А.П. Господарикова, В.А. Еременко, А.А. Козырева, С.А. Козырева, Б.Н. Кутузова, Г.М. Ляхова, С.В. Медведева, П.С. Миронова, В.Н. Мосинца, М.А. Садовского, Я.И. Цейтлина, Б.В. Эквиста, М.Б. Эткина, Y. Vo, P. Vormann, D.B. Larson, A.P. Moser и др.

Многие авторы, исследуя процесс воздействия сейсмозрывных волн на производственную инфраструктуру, в своих работах применяли аналитические и экспериментальные методы. Однако, с появлением мощных вычислительных ресурсов значительно выросла эффективность численных методов, позволяющих наиболее полноценно учитывать условия влияния сейсмозрывной волны, например, на массив горных пород, вмещающий горизонтальную горную выработку. Также отметим, что на горном предприятии проведение реальных испытаний значительно дороже как по времени, так и по материальным затратам.

Таким образом, разработка эффективных численных алгоритмов, вычислительных программ и программных комплексов, позволяющих на основе разработанной математической модели достоверно оценить безопасный уровень воздействия сейсмозрывной волны на горную выработку при массовых взрывах, является в настоящее время весьма актуальной задачей исследования.

Цель диссертационной работы. На основе результатов математического моделирования воздействия сейсмозрывной волны на слоистый (неоднородный) массив горных пород, вмещающий горизонтальную горную выработку, обосновать выбор безопасных параметров ведения буровзрывных работ, позволяющих обеспечить сохранность подземного сооружения (горной выработки).

Идея диссертационной работы. Оценку безопасного воздействия сейсмозрывной волны на массив горных пород, вмещающий горную выработку, необходимо осуществлять на основе результатов численных расчетов его основных параметров напряженно-деформированного состояния (НДС), полученных с помощью разработанного эффективного вычислительного программного комплекса.

Основные задачи исследований:

1. Выявление особенностей распространения сейсмозрывной волны при проведении массовых взрывов на карьерах Кировского рудника АО «Апатит».

2. Оценку воздействия сейсмозрывной волны на массив горных пород, включающий горную выработку, осуществлять на основе значений продольных и поперечных деформаций скального грунта, скоростей смещения массива горных пород.

3. Определение напряженного состояния массива горных пород, включающего горизонтальную горную выработку.

4. Разработка математической модели, адекватно описывающей воздействие сейсмозрывной волны на слоистый (неоднородный) массив горных пород в окрестности горизонтальной горной выработки.

5. Построение численных алгоритмов и разработка программного вычислительного комплекса для модельных и важных прикладных задач геомеханики.

6. Выполнение многочисленных численных расчётов на основе разработанного вычислительного программного комплекса для выбора безопасных параметров ведения буровзрывных работ при отработке месторождения апатит-нефелиновых руд (Объединённый Кировский рудник) и широкое сопоставление их с натурными данными.

Методы исследований. В диссертационной работе использованы различные методы исследований, такие как: анализ и обобщение необходимого научного и практического опыта; разработка математической и геомеханической моделей, построение разностных схем и эффективных численных алгоритмов; разработка вычислительного программного комплекса с использованием новейших информационных технологий для численного моделирования, анализа и визуализации;

изучение и обработка большого объема данных по сейсмособытиям. В основе научных исследований лежат труды российских и зарубежных авторов, специализирующихся на оценке взаимодействия сейсмозрывной волны с массивом горных пород, включающим горизонтальную горную выработку.

Научная новизна:

1. Разработана и обоснована геомеханическая модель воздействия сейсмозрывной волны на слоистый (неоднородный) массив горных пород, вмещающий горизонтальную горную выработку;

2. Получены закономерности изменения основных параметров напряженного состояния слоистого (неоднородного) массива горных пород, вмещающего выработку, при взаимодействии с сейсмозрывной волной.

Теоретические исследования проводятся в области распространения сейсмозрывной волны в неоднородном горном массиве с учётом основных геомеханических характеристик слоёв, окружающих выработку.

Защищаемые положения:

1. Оценку воздействия сейсмозрывной волны на неоднородный массив горных пород, вмещающий горизонтальную горную выработку, необходимо производить на основе разработанной геомеханической модели, базирующейся на уравнениях динамической теории упругости Мизеса.

2. Надёжное прогнозирование НДС неоднородного слоистого массива, вмещающего горизонтальную горную выработку, при воздействии на него сейсмозрывной волны необходимо осуществлять на основе результатов применения вычислительного программного комплекса, включающего разработанные эффективные численные алгоритмы.

3. Выбор и обоснование безопасных параметров ведения буровзрывных работ при отработке месторождения апатит-нефелиновых руд Объединённого Кировского рудника должны включать в себя результаты численного моделирования разработанной геомеханической модели воздействия сейсмозрывной волны на массив горных пород для обеспечения безопасности действующей горизонтальной горной выработки.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны геомеханическая и математическая модели, численные алгоритмы и вычислительный программный комплекс на языке JavaScript для моделирования воздействия сейсмозрывной волны на

слоистый массив горных пород, вмещающий горизонтальную горную выработку;

2. Определены основные параметры НДС массива горных пород для необходимой оценки прочности крепи горизонтальной горной выработки при ведении буровзрывных работ на месторождениях апатит-нефелиновых руд (Объединённый Кировский рудник).

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается строгостью постановки рассматриваемых задач, использованием разработанных геомеханической и комплексной математической моделей воздействия сейсмозрывной волны на слоистый массив горных пород, использованием методов численного интегрирования применительно к системам разрешающих дифференциальных уравнений, а также допустимой сходимостью результатов математического моделирования с результатами натурных замеров.

Апробация работы. Основные положения и содержание диссертационной работы докладывались на Международном форуме-конкурсе «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2012 г.), на VIII международной научно-технической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий» (Санкт-Петербург, 2017 г.), на Международном форуме-конкурсе «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2017 г.), на Международной научно-практической конференции «Современные проблемы геомеханики при освоении месторождений полезных ископаемых и подземного пространства мегаполисов» (Санкт-Петербург, 2017 г.), а также на регулярных заседаниях кафедры взрывного дела.

Личный вклад автора:

1. Анализ и обработка натурных замеров во время проведения буровзрывных работ на Объединённом Кировском руднике;

2. Разработка геомеханической и математической моделей воздействия сейсмозрывной волны на массив горных пород, вмещающий горизонтальную горную выработку;

3. Построение численных методик и использование алгоритмов прямого интегрирования применительно к системам разрешающих дифференциальных уравнений;

4. Разработка вычислительного программного комплекса для математического моделирования взаимодействия сейсмозрывной волны с массивом горных пород, вмещающим горизонтальную выработку.

Реализация результатов работы. Результаты научных исследований рекомендуются к применению в работе проектных организаций для расчётов, связанных с сейсмическим действием на

действующие горные выработки при проектировании массовых взрывов. Теоретические выводы и практические результаты диссертационной работы внедрены в образовательный процесс Горного университета в дисциплинах: «Проектирование и организация взрывных работ», «Технология и безопасность взрывных работ».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, 3 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Получены 2 свидетельства о регистрации программного продукта.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 125 странице машинописного текста, содержит 4 главы, введение и заключение, список литературы из 150 наименований, 70 рисунков и 38 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** представлены основные принципы генерации сейсмозрывной волны, также приведен анализ состояния и перспективы развития методов исследования НДС слоистого (неоднородного) массива горных пород, включающий горизонтальную горную выработку, обозначены проблемы безопасности охраняемых объектов, а именно горных выработок.

Во **второй главе** приведена математическая модель распространения сейсмозрывной волны и её воздействие на горизонтальную горную выработку в однослойной и многослойных средах. Приведено решение статической задачи методом установления. Дана оригинальная расчетно-разностная схема решения краевой задачи.

Третья глава включает алгоритм численного решения краевой задачи, реализующий полученную математическую модель. Продемонстрирована работа разработанного вычислительного программного комплекса.

В **четвертой главе** приведены сравнения натурных измерений с численными решениями показывающие достоверность полученных результатов. Даны рекомендации по обеспечению безопасности горной выработки.

В **заключении** подводится итог проделанной работы.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю профессору А.П. Господарикову, сотрудникам кафедры взрывного дела, а также Г.А. Колтону, В.А. Артёмову и А.В. Аспедникову за помощь в подготовке и выполнении диссертационной работы.

Основные результаты исследования отражены в защищаемых положениях:

1. Оценку воздействия сейсмозрывной волны на неоднородный массив горных пород, вмещающий горизонтальную горную выработку, необходимо производить на основе разработанной геомеханической модели, базирующейся на уравнениях динамической теории упругости Мизеса.

Для описания воздействия сейсмозрывной волны на горную выработку в работе используется математическая модель на основе уравнений динамической теории упругости Мизеса в криволинейных координатах. Обозначения, принятые на рисунке 1: x – расстояние MM_1 от точки M до границы горной выработки; y – длина дуги Γ от точки O до точки M_1 ; O – точка соприкосновения фронта C_1 падающей волны с границей горной выработки; сплошная линия – граница горной выработки, пунктирные линии – границы слоев, N – число слоев, при котором наружный слой обозначен номером 1.

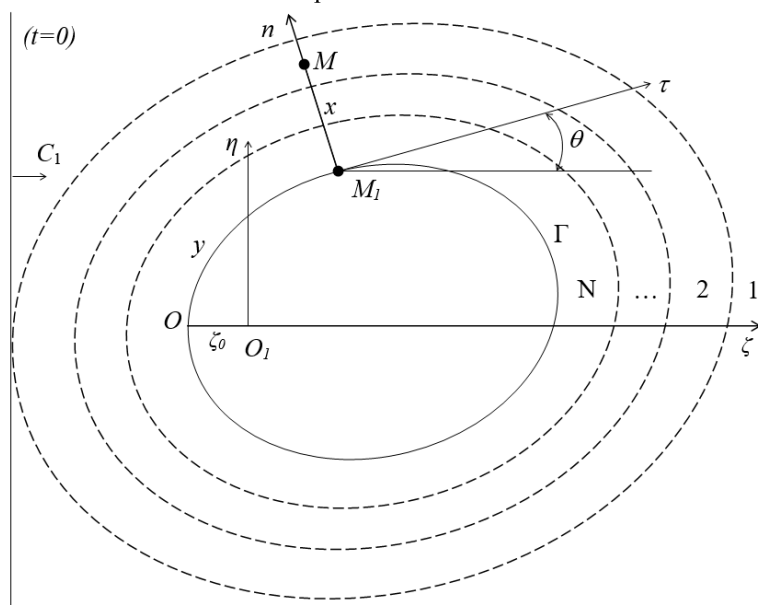


Рисунок 1 – Система координат для многослойного расчёта

Используя уравнения динамической теории упругости в координатах Мизеса с учетом их некоторых модификаций, для каждого слоя имеем следующую систему дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_1^i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{11}^i}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \sigma_{12}^i}{\partial y} + \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial x} (\sigma_{11}^i - \sigma_{22}^i); \\ \frac{\partial v_2^i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{12}^i}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \sigma_{22}^i}{\partial y} + \frac{2}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \sigma_{12}^i; \\ \frac{\partial \sigma_{11}^i}{\partial t} = \frac{\partial v_1^i}{\partial x} + \frac{(1-2b^i)}{H} \frac{\partial v_2^i}{\partial y} + \frac{(1-2b^i)}{H} \frac{\partial H}{\partial x} v_1^i; \\ \frac{\partial \sigma_{22}^i}{\partial t} = (1-2b^i) \frac{\partial v_1^i}{\partial x} + \frac{1}{H} \left(\frac{\partial v_2^i}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial x} v_1^i \right); \\ \frac{\partial \sigma_{12}^i}{\partial t} = b^i \left(\frac{1}{H} \frac{\partial v_1^i}{\partial y} + \frac{\partial v_2^i}{\partial x} - \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial x} v_2^i \right); \end{cases} \quad (1)$$

где v_1^i, v_2^i – компоненты вектора скорости частицы массива горных пород по координатным осям M_{1x} и M_{1y} , соответственно; $\sigma_{11}^i, \sigma_{22}^i, \sigma_{12}^i$ – компоненты тензора напряжений; $H=1+k(y) \cdot x$ – коэффициент Ламе, $k(y)$ – кривизна поверхности выработки в точке M_1 ; $b^i = \frac{1-2\nu^i}{2(1-\nu^i)}$; ν^i – коэффициент Пуассона;

координаты отнесены к характерному размеру горной выработки $L = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$, m ; S – площадь выработки, m^2 ; компоненты вектора скорости – к скорости распространения продольной волны в i -ом слое $c^i = \sqrt{\frac{E^i(1-\nu^i)}{\rho^i(1+\nu^i)(1-2\nu^i)}}$, m/c ; E^i – модуль Юнга, Pa ; ρ^i – плотность среды, $кг/м^3$; компоненты тензора напряжений отнесены к величине $\rho^i(c^i)^2$; компоненты вектора скорости – к величине c^i ; время t – к величине L/c^i ; время t отсчитывается от момента встречи фронта падающей волны с границей между первым и вторым слоями.

Систему (1) дифференциальных уравнений первого порядка в частных производных запишем в матричной форме:

$$\frac{\partial U^i}{\partial t} + B^i \frac{\partial U^i}{\partial x} + p C^i \frac{\partial U^i}{\partial y} + q Q^i U^i = 0, \quad (2)$$

где $U^i = \{v_1^i, v_2^i, \sigma_{11}^i, \sigma_{22}^i, \sigma_{12}^i\}^T$ – вектор неизвестных; $p = \frac{1}{H}$; $q = \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x}$.

Постоянные матрицы пятого порядка, присутствующие в матричном уравнении (2), имеют вид:

$$B^i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-2b^i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b^i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, C^i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1-2b^i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ b^i & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, Q^i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 1-2b^i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b^i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для замыкания системы (1) краевыми условиями в работе рассматриваются следующие условия:

1. Граничные условия на поверхности полости (горной выработки):

$$\sigma_{11}|_{x=0} = \sigma_{12}|_{x=0} = 0 \quad (3)$$

или в матричном виде

$$SU|_{x=0} = 0, \quad (4)$$

где прямоугольная матрица S имеет вид

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

условие периодичности

$$U|_{y=0} = U|_{y=l}, \quad (6)$$

где l – длина дуги линии Г.

2. Начальные условия в начальный момент времени $t = 0$ определяют поля напряжений и скоростей по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^0 &= \sigma^0 (\zeta_0 - \zeta) (\sin^2 \theta - b \cos^2 \theta); \\ \sigma_{12}^0 &= -\sigma^0 (\zeta_0 - \zeta) (1-b) \sin \theta \cos \theta; \\ \sigma_{22}^0 &= \sigma^0 (\zeta_0 - \zeta) (\cos^2 \theta + b \sin^2 \theta); \\ v_1^0 &= -\sigma^0 (\zeta_0 - \zeta) \sin \theta; \\ v_2^0 &= \sigma^0 (\zeta_0 - \zeta) \cos \theta. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, геомеханическая модель адекватно описывает напряженно-деформированное состояние массива горных пород, включающего горизонтальную горную выработку, под воздействием сейсмозрывной волны.

2. Надежное прогнозирование НДС неоднородного слоистого массива, вмещающего горизонтальную горную выработку, при воздействии на него сейсмозрывной волны необходимо осуществлять на основе результатов применения вычислительного программного комплекса, включающего разработанные эффективные численные алгоритмы.

Для численного решения краевой задачи, которая представлена в виде дифференциального матричного уравнения с граничными и начальными условиями, в работе построена расчетная разностная схема для уравнения (2).

Затем область изменения переменных x, y (расчетная область) необходимо разбить на прямоугольники с помощью прямых линий $x=x_j^L (j=1,2,\dots,J^L)$ и $y=y_m (m=1,2,\dots,M)$, а в пространстве (x, y, t) с помощью плоскостей $x=x_{j-1}, x=x_j, y=y_{k-1}, y=y_k, t=t', t=t'+\tau$ выделить элементарный параллелепипед V , в результате чего получается конечно-разностная схема решения краевой задачи (рисунок 2).

Конечно-разностное уравнение задачи для конкретного слоя имеет вид:

$$U^{jm} = \left[E - \gamma \frac{\tau}{h_x} \Phi_x - \gamma \frac{\tau}{h_y} (p_{jm}^+ \Phi_y^+ + p_{j,m-1}^- \Phi_y^-) \right] U_{jm} + \gamma \frac{\tau}{h_x} (\Phi_x^+ U_{j-1,m} + \Phi_x^- U_{j+1,m}) + \gamma \frac{\tau}{h_y} (p_{j,m-1}^+ \Phi_y^+ U_{j,m-1} + p_{jm}^- \Phi_y^- U_{j,m+1}) - (TU)_{jm} \gamma \tau; \gamma = \frac{c}{\Gamma}. \quad (8)$$

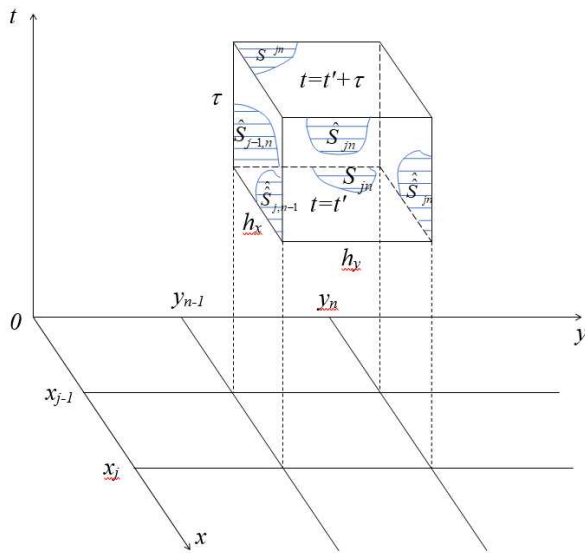


Рисунок 2 – Схема постановки краевых условий на границе слоев

Для организации сквозного счета, необходимо поставить краевые условия на границе слоев (рисунок 3).

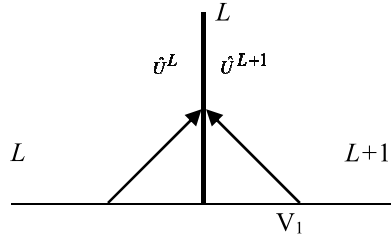


Рисунок 3 – Схема постановки краевых условий на границе слоев

На рисунке 3 изображены L и $L+1$ номера слоев, при этом номер границы совпадает с номером прилегающего к ней левого слоя L . Принимая слои жестко сцепленными друг с другом, краевые условия на границе запишем в виде:

$$\begin{cases} b \cdot \hat{\sigma}_{11}^L = \hat{\sigma}_{11}^{L+1}; \\ b \cdot \hat{\sigma}_{12}^L = \hat{\sigma}_{12}^{L+1}; \\ a \cdot \hat{v}_1^L = \hat{v}_1^{L+1}; \\ a \cdot \hat{v}_2^L = \hat{v}_2^{L+1}, \end{cases} \quad (9)$$

где $\hat{\sigma}, \hat{v}$ обозначают соответствующие параметры (компоненты тензора напряжений и вектора скорости) по обе стороны от границы слоев L и $L+1$;

$$a = \frac{c^L}{c^{L+1}}; \quad b = a^2 \frac{\rho^L}{\rho^{L+1}}.$$

Представим граничные условия (9) в матричной форме:

$$Z \cdot \hat{U} = 0,$$

$$\text{где } \hat{U} = \begin{pmatrix} \hat{U}^{L+1} \\ \hat{U}^L \end{pmatrix}, \quad \hat{U}^L = \begin{pmatrix} \hat{v}_1^L \\ \hat{v}_2^L \\ \hat{\sigma}_{11}^L \\ \hat{\sigma}_{22}^L \\ \hat{\sigma}_{12}^L \end{pmatrix}, \quad \hat{U}^{L+1} = \begin{pmatrix} \hat{v}_1^{L+1} \\ \hat{v}_2^{L+1} \\ \hat{\sigma}_{11}^{L+1} \\ \hat{\sigma}_{22}^{L+1} \\ \hat{\sigma}_{12}^{L+1} \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -b \end{pmatrix}.$$

С помощью условия сохранения инвариантов Римана определим все компоненты вектора неизвестных \hat{U} :

$$\begin{cases} \hat{v}_1^{L+1} = v_1^{L+1} \\ \hat{v}_2^{L+1} = v_2^{L+1} \\ \hat{v}_3^{L+1} = v_3^{L+1} \end{cases}; \begin{cases} \hat{v}_3^L = v_3^L \\ \hat{v}_4^L = v_4^L \\ \hat{v}_5^L = v_5^L \end{cases},$$

при этом векторы $\hat{V} = \begin{pmatrix} \hat{v}_1^{L+1} \\ \hat{v}_2^{L+1} \\ \hat{v}_3^{L+1} \\ \hat{v}_3^L \\ \hat{v}_4^L \\ \hat{v}_5^L \end{pmatrix}$ и \hat{U} связаны соотношением вида $\hat{V} = \Omega \hat{U}$,

где $\Omega = \begin{pmatrix} \Lambda_{1-3}^{L+1} & 0 \\ 0 & \Lambda_{3-5}^L \end{pmatrix}$, $\Lambda^i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\psi & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\delta & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \psi & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ – матрица левых собственных

векторов матрицы B^i , $\psi = \sqrt{b^i}$, $\delta = 1 - 2b^i$, $b^i = \frac{1-2v^i}{2(1-v^i)}$.

После введения матрицы $\Pi = \begin{pmatrix} \Omega \\ Z \end{pmatrix}$ система для получения компонентов вектора неизвестных \hat{U} в матричной форме примет вид:

$$\Pi \hat{U} = \Omega^0 \cdot U,$$

где $U = (v_1^{L+1} \ v_2^{L+1} \ \sigma_{11}^{L+1} \ \sigma_{22}^{L+1} \ \sigma_{12}^{L+1} \ v_1^L \ v_2^L \ \sigma_{11}^L \ \sigma_{22}^L \ \sigma_{12}^L)^T$ – вектор, каждый компонент которого является значением соответствующей величины в ячейках, примыкающих к границе слоев L и $L+1$; $\Omega^0 = \begin{pmatrix} \Omega \\ 0 \end{pmatrix}$.

Приходим окончательно к выражению

$$\hat{U} = \Pi^{-1} \cdot \Omega^0 \cdot U. \quad (10)$$

Для выполнения численного счета предлагается ввести фиктивные ячейки: $S_{0,p}^L$ для слоя L и $S_{J^{L+1},p}^{L+1}$ для слоя $L+1$; далее полагаем $U_{0,k}^L = \hat{U}_k^L$,

$k = 1, 2, \dots, 5$; $U_{J^{L+1},k}^{L+1} = \hat{U}_k^L$, $k = 6, 7, \dots, 10$.

Решение данной краевой задачи выполним с помощью пошагового алгоритма. При условии, что на временном слое $t=t'$ состояние среды уже известно, переход на следующий временной слой $t=t'+\tau$ осуществляется

заполнением всех фиктивных ячеек при помощи выражения (10) с последующим применением соотношения (8). В процессе каждого такого перехода размер расчетной области уменьшается на одну ячейку по оси Ox . Следовательно, при необходимости построить решение в произвольном

прямоугольнике $\begin{cases} x \in [0, x^1], \\ y \in [0, l] \end{cases}$, для всех значений $t \in [0, T]$, требуется, чтобы

расчетная область изначально занимала по меньшей мере прямоугольник

$$\begin{cases} x \in [0, x^1 + T], \\ y \in [0, l]. \end{cases}$$

На основе принятых разностных схем и краевых условий разработан программный комплекс на языке JavaScript, решающий поставленную задачу, а именно определение основных параметров НДС слоистого горного массива, окружающего горизонтальную выработку, под воздействием сейсмозрывной волны.

Основной экран конструктора для запуска расчётов изображен на рисунке 6. Основные формы выработок наиболее часто используемых при расчётах представлены на рисунке 9. Визуализация сценария для поля скоростей v_1 представлена на рисунке 10. Вокруг выработки можно располагать реперные точки для которых будут строиться графики по основным параметрам скоростям смещения грунта, ускорениям, напряжениям и деформациям. Примеры графиков представлены на рисунках 7 и 8.

3. Выбор и обоснование безопасных параметров ведения бурозрывных работ при отработке месторождения апатит-нефелиновых руд Объединённого Кировского рудника должны включать в себя результаты численного моделирования разработанной геомеханической модели воздействия сейсмозрывной волны на массив горных пород для обеспечения безопасности действующей горизонтальной горной выработки.

Исходные данные с Объединённого Кировского рудника получены в виде базы данных сейсмособытий. Данные хранятся в системе управления базами данных Microsoft SQL (рисунок 4). Реляционные зависимости между таблицами представлены на рисунке 5. Описание основных полей таблицы сейсмособытий представлены в таблице 0.

Results	Messages	ETime	ELen	EK	EY	E2	E2-Pad	E2err	E2errp STD	Magnitude	Moment	SwdScore
1		2015-08-12 07:37:29.000	5.457	2746.9190742147	651.767163387181	32.0472369361727	0.83334617403884	191725.347118308	229913.14077223	0.70548620128563	23178198.784	25.02312678
2		2015-08-12 07:25:14.000	13.001	405.649622847196	163.120121460277	24.4586033087208	0.81566477989598	141393.149850506	1370028.06830105	1.18258049626205	116478452610.532	27.69819838
3		2015-08-12 07:08:19.000	5.206	3425.6838918262	769.698637959699	13.7056003003265	0.808410776999465	61918.995715919	78434.8196531776	0.83503147084663	2732121725.8999	33.14286191
4		2015-08-12 07:08:20.000	4.577	1945.6799659004	332.376444704734	18.156437038853	0.81958042017375	77469.597671222	29512.3127491812	0.48999181212991	647866912761.953	27.81661706
5		2015-08-12 07:05:50.000	8.534	1184.097953128	196.31570541195	-27.117104479504	0.89903931974901	1638791.2888196	1422491.04020498	1.21798217598925	306246668888.568	30.72872111
6		2015-08-12 07:03:31.000	8.391	20274.9164081718	458.940264940313	149.200210991701	0.958880731938018	184966.00701386	169269.216288256	0.804819889957602	3893919386.3976	18.8741667
7		2015-08-12 07:02:45.000	13.001	3041.9897942314	513.379969188404	198.899896520951	0.88890302170078	208264.4621495	2000965.64297065	1.35801908225446	95107220824.723	49.452601
8		2015-08-12 07:01:58.000	10.899	3447.39182848278	843.789778912952	2.75326689033891	0.69594826034651	423424.282836937	311277.611187772	0.89472610424015	96345462067.372	64.7270352
9		2015-08-12 06:59:59.000	14.649	3177.870717942	704.50419118626	11.884622649724	0.94089750275267	639959.441160885	189172.039881108	0.981076363382828	8765967119.3629	45.47674932
10		2015-08-12 06:58:53.000	29	3008.38904639695	798.36433189214	89.1037180997818	0.95432898964646	1174369.33720503	2194961.4484816	1.25067780330318	426492031323.038	25.4778732
11		2015-08-12 06:57:29.000	3.001	1134.820519625	210.28207822024	4.65049377189391	0.77103882019805	11179.062901743	8008.4719388299	0.024622681179832	5276329630.7843	59.1584854
12		2015-08-12 06:54:43.000	18.898	1008.104209804	591.68293995442	-132.88225400876	0.9187778045776	209342.899044932	312228.54128918	0.88014019486817	28984748227.196	59.42620999
13		2015-08-12 06:53:00.000	29	2901.15114743651	-48.648978932956	-102.295176530304	0.83339639132915	4767976.370249496	789113.74327825	0.91994641125675	1982427963.973	39.9890052
14		2015-08-12 06:51:23.000	20.797	1205.10896361548	127.527134400154	-112.634797736615	0.75007898686183	2488526.9851929	205826.06634789	1.3177862489842	47487880834.534	15.98146538
15		2015-08-12 04:29:49.000	13.362	3151.5062264926	494.6329771142	140.403472620717	0.97696868344476	6389785.27861474	347379.48727013	1.54330022529578	11979995426.264	27.75209059
16		2015-08-12 03:15:48.000	3.005	1136.1052231978	207.270271584422	26.132244487079	0.64999426174029	3963163.7624412	2035.06623954546	0.522103991687097	10811664981.031	23.2115056
17		2015-08-11 22:28:15.000	4.031	3215.6288820632	772.108965422311	137.956870949897	0.77463098020912	37074.6357656651	0.0001798796305834	0.31289281182331	184371755796.617	68.5012722
18		2015-08-11 22:28:51.000	19.718	831.84829693872	371.542078933842	-7.8836330919127	0.869920274126248	790917.962267678	691146.468327746	1.0341389263999	27297722624.769	30.03857478
19		2015-08-11 22:21:03.000	29	1118.0148979487	631.43483777084	-188.269129270926	0.794462298230397	4647898.9800979	464430.80841442	1.46178397333881	332179598144.09	31.98021291
20		2015-08-11 22:21:07.000	17.785	804.72259951586	338.43853194104	-0.3620204980084	0.85676427988318	16796029.3540667	22799972.8110345	1.773789651671	371520611286.67	40.08396796
21		2015-08-11 21:08:09.000	4.848	884.54826202827	317.648382800898	0.38620000197651	0.791171767368482	800200.00207914	670144.779701907	1.04781704881603	101879548430.47	17.00929050

Рисунок 4 – Натурные данные хранятся в Microsoft SQL Server Management Studio

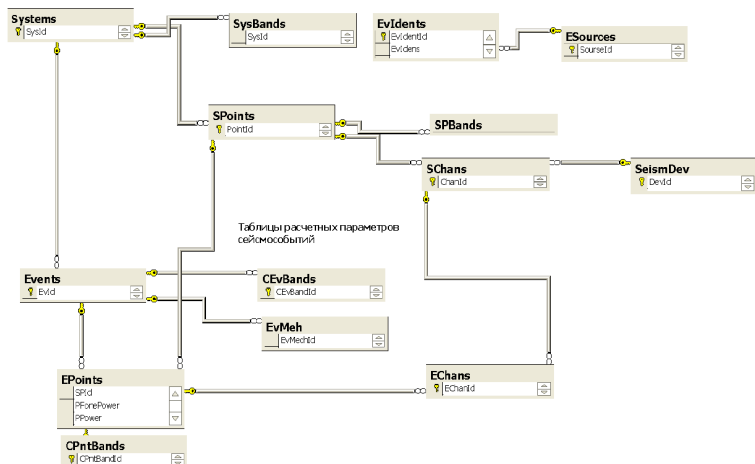


Рисунок 5 – Структура базы данных

Таблица 1 – Описание основных полей таблицы Events:

Название поля	Тип данных	Комментарий
EvId	bigint	Идентификатор события - первичный ключ
ESysId	int	Идентификатор сейсмической системы
ELocTime	datetime	Время события локальное
Estate	int	Статус расчета события: 0 – ОК; 1 – недостаточно пунктов для расчета; 2 – недопустимая конфигурация сеймопунктов; 3, 4 – точное решение не получено; 5 – координаты события за зоной регистрации
ETypeld	int	Идентификатор
EX, EY, EZ	float	Координаты гипоцентра сеймособытия. Координата X, Y, Z соответственно, м
EEnergy	float	Энергия сеймособытия, Дж
Moment	float	Сейсмический момент события
SizeOfSource	float	Размер очага, м
Magnituda	float	Магнитуда
DinSigma	float	Динамический сброс напряжений в очаге
MomentP	float	Сейсмический момент, рассчитанный по P волне
MomentS	float	Сейсмический момент, рассчитанный по S волне
ECalcParTime	datetime	Расчетное время события
EQuality	smallint	Экспертное качество расчета параметров

Представлены результаты моделирования сейсмической волны, распространяющейся в горном массиве, в условиях, приближенных к Объединенному Кировскому руднику.

Волна падает под углом 0° , эпюра волны представлена на рисунке 12. Энергия взрыва составляет 2,12 ГДж при размере очага взрыва 50,8 м; магнитуда 2,93; σ^0 равна 12,9 МПа. Ориентировочная масса ВВ при массовом взрыве составляет 50,7 т.

Горная выработка находится на глубине 500 м. В данном случае рассматривается четыре слоя вокруг горной выработки, параметры слоев приведены в таблице 2. Форма выработки представлена на рисунке 11, ширина и высота составляют 8 м и 5 м, соответственно. Данные о контрольных (реперных) точках находятся в таблице 3.

Таблица 2 – Параметры слоев

№	Наименование	Е, ГПа	ρ , кг/м ³	ν	Н, м
1	Хибиниты	42	2630	0,25	2
2	Гнейсы	65	2600	0,22	2
3	Ийолиты	80	2790	0,21	2
3	Сталь	200	7800	0,28	1

Таблица 3 – Расположение контрольных точек

№	Расстояние от центра выработки, м	Угол поворота, град	Цвет
1	8,884	0	красный
2	10,884	90	голубой
3	5	30	зеленый
4	3,5	0	фиолетовый
5	5	0	синий

Графики проекций σ_{11} и σ_{22} представлены на рисунках 14 и 15, максимальные значения не превышают значения напряжения на разрыв стали. Также, как видно по графикам скорости на рисунке 13, значения не превышают 120 см/с. Согласно методике, представленной М.Б. Эткиным и А.Е. Азарковичем, такие результаты соответствуют 4 уровню обеспечения безопасности. Степень возможных повреждений объектов – умеренная. Возможно развитие имеющихся трещин и заколов с вывалом отдельных кусков на обнажениях скальных массивов и бортах горных выработок. Изменение режима работы: приостановка работы на время взрыва и проведения ремонтных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предлагается новое решение актуальной задачи обеспечения безопасности горных выработок при проведении массовых взрывов на Объединенном Кировском руднике. По итогам диссертационной работы можно сделать следующие заключения:

1. Построена математическая модель взаимодействия сейсмозрывной волны с неоднородным массивом горных пород, вмещающим горизонтальную горную выработку.

2. В соответствии с разработанными расчетными схемами проведено численное интегрирование уравнений математической модели, описывающей влияние сейсмозрывной волны на слоистый массив горных пород, вмещающий горизонтальную горную выработку.

3. Разработан вычислительный программный комплекс, моделирующий основные параметры НДС при воздействии сейсмозрывной волны на слоистый массив горных пород, включающий горизонтальную выработку. В состав программного комплекса входят мощные средства для визуализации полей напряжений, скоростей, деформаций, ускорений и построения графиков указанных величин для выбранных пользователем реперных точек.

4. Подтверждена достоверность разработанных расчетных схем и численных алгоритмов путем сравнения натуральных данных с результатами численного моделирования.

5. Определены безопасные параметры буровзрывных работ для обеспечения сохранности горизонтальной горной выработки с помощью разработанного программного комплекса.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Выходцев, Я.Н. Визуализация математической модели взаимодействия взрывной волны с выработками и твердыми включениями [Текст] / **Я.Н. Выходцев**, Г.А. Колтон, Е.П. Иванченко // Записки Горного института. – 2013. – Т. 206 – С. 213-216.

2. Господариков, А.П. Математическое моделирование воздействия сейсмозрывных волн на горный массив, включающий выработку [Текст] / А.П. Господариков, **Я.Н. Выходцев**, М.А. Зацепин // Записки Горного института – 2017. – Т. 226 – С. 405-411.

3. Господариков, А.П. Об одном подходе математического моделирования воздействия сейсмозрывных волн на слоистый горный массив, включающий горную выработку [Текст] / А.П. Господариков, **Я.Н. Выходцев** // Маркшейдерский вестник. – 2017. – №3 – С. 61-65.

В прочих изданиях:

4. Выходцев Я.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017616454. Многофункциональный инструмент расчёта параметров сплошного массива горных пород, включающий горную выработку / **Я.Н. Выходцев**, А.П. Господариков; заявитель и правообладатель ФГБОУ высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU). – №2017616454; заявл. 24.04.2017; опубли. 07.06.2017, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

5. Выходцев Я.Н. Визуализация воздействия сейсмозрывных волн на массив горных пород, включающий горную выработку [Текст] / **Я.Н. Выходцев** // Сборник научных трудов IV Международной научно-методической конференции «Современные образовательные технологии в преподавании естественно-научных и гуманитарных дисциплин». – 2017. – С. 300-305.

6. Господариков А.П. О некоторых результатах численного моделирования воздействия сейсмозрывных волн на слоистую неоднородную среду, включающую выработку [Текст] / А.П. Господариков, **Я.Н. Выходцев** // Сборник научных трудов VIII Международной научно-технической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ». – 2017. – С. 285-292.

7. Ковалевский В.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018614455. Расчёт параметров буровзрывных работ при скважинной отбойке руды в подземных условиях / В.Н. Ковалевский, **Я.Н. Выходцев**, А.В. Мысин; заявитель и правообладатель ФГБОУ высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU). – №2018614455; заявл. 15.02.2018; опубл. 06.04.2018, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.



Рисунок 6 – Конфигуратор для запуска расчётов

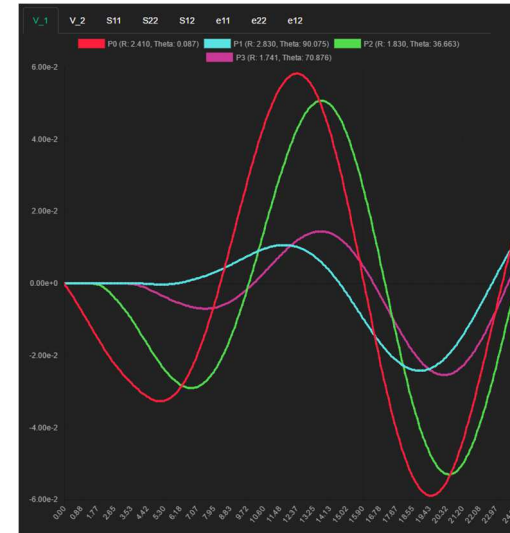


Рисунок 7 – Визуализация сценария. Графики скоростей в реперных точках

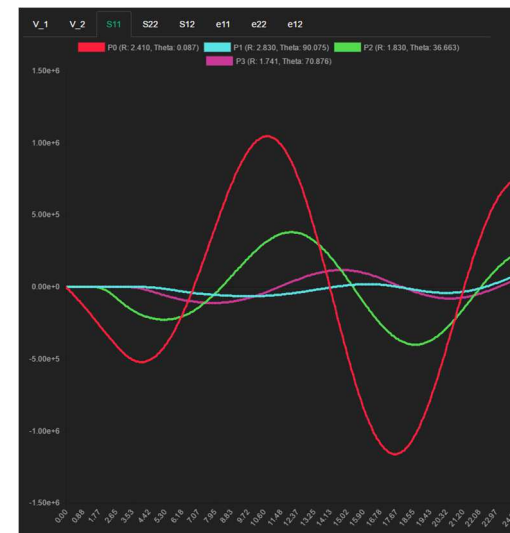


Рисунок 8 – Визуализация сценария. Графики напряжений в реперных точках

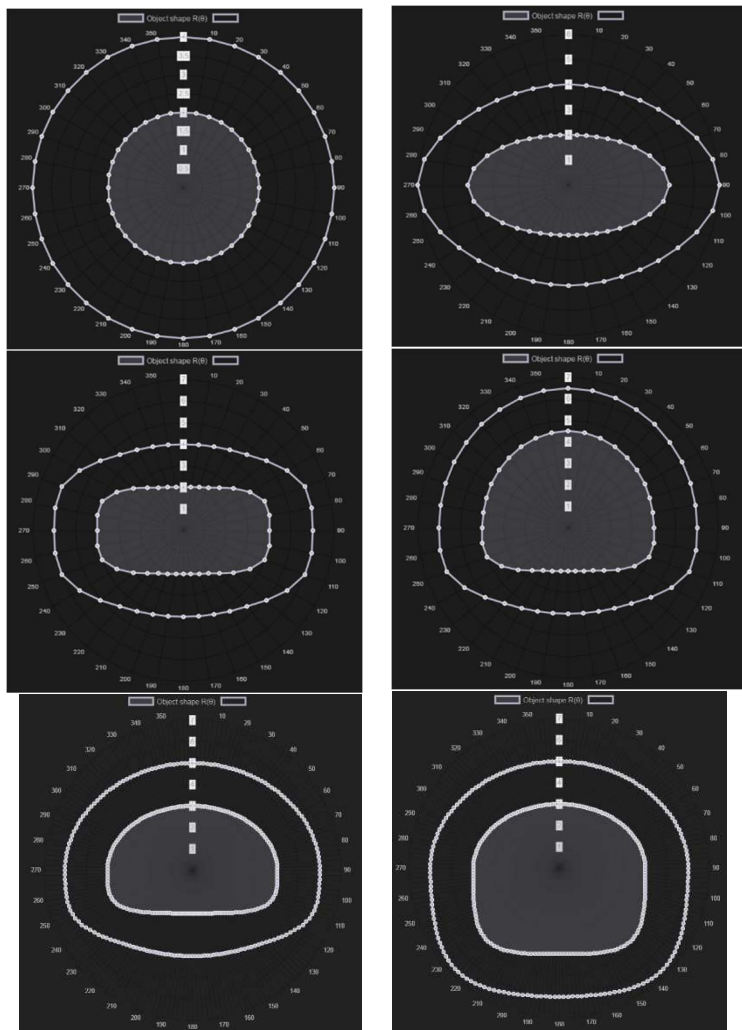


Рисунок 9 – Формы выработок, используемых при расчётах

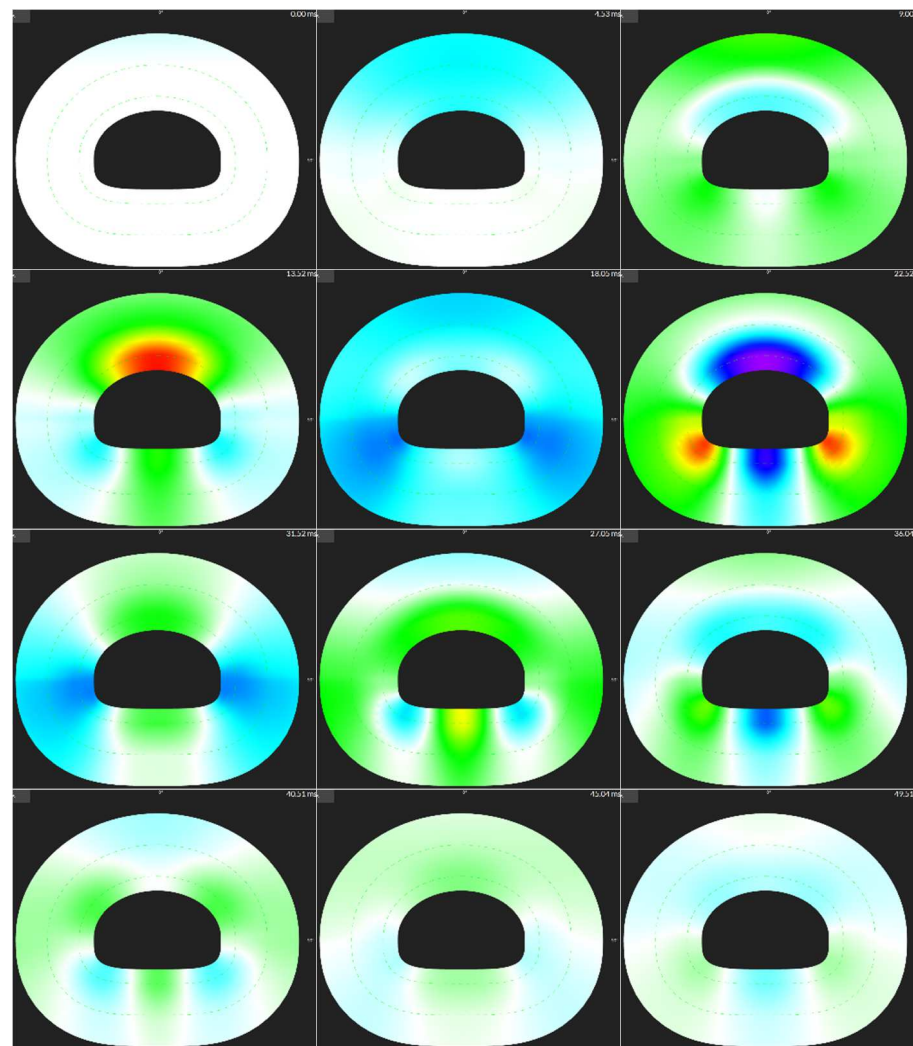


Рисунок 10 – Визуализация сценария. Изменение поля v_1 во времени

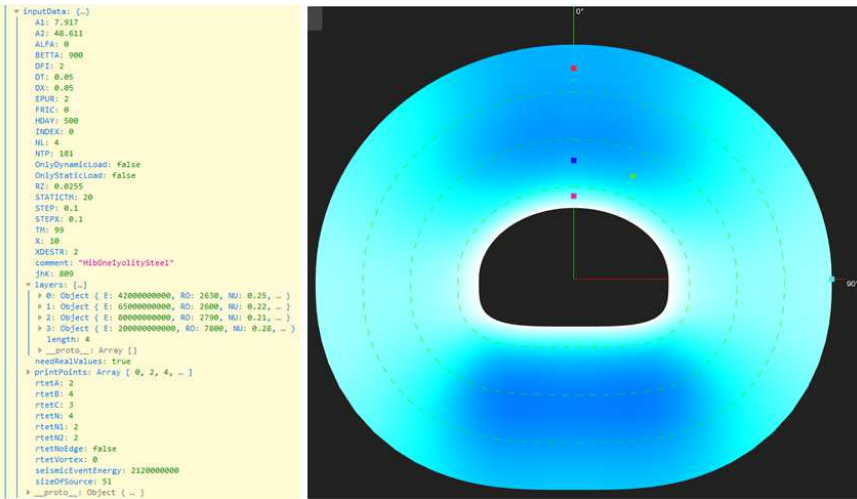


Рисунок 11 – Основные параметры расчёта и расположение реперных точек

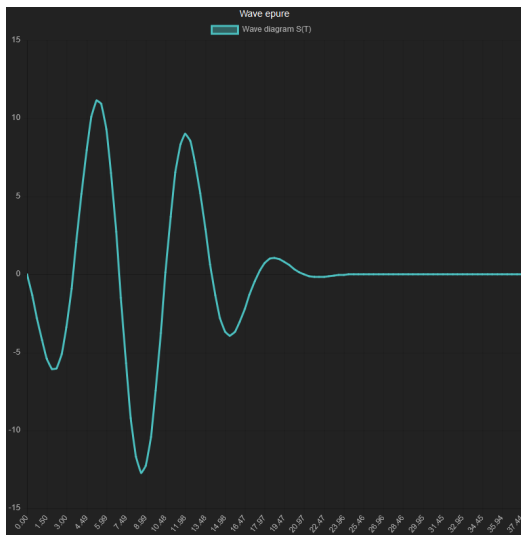


Рисунок 12 – Эпюра волны (по горизонтальной оси время, мс; по вертикальной оси напряжение на фронте волны, МПа)

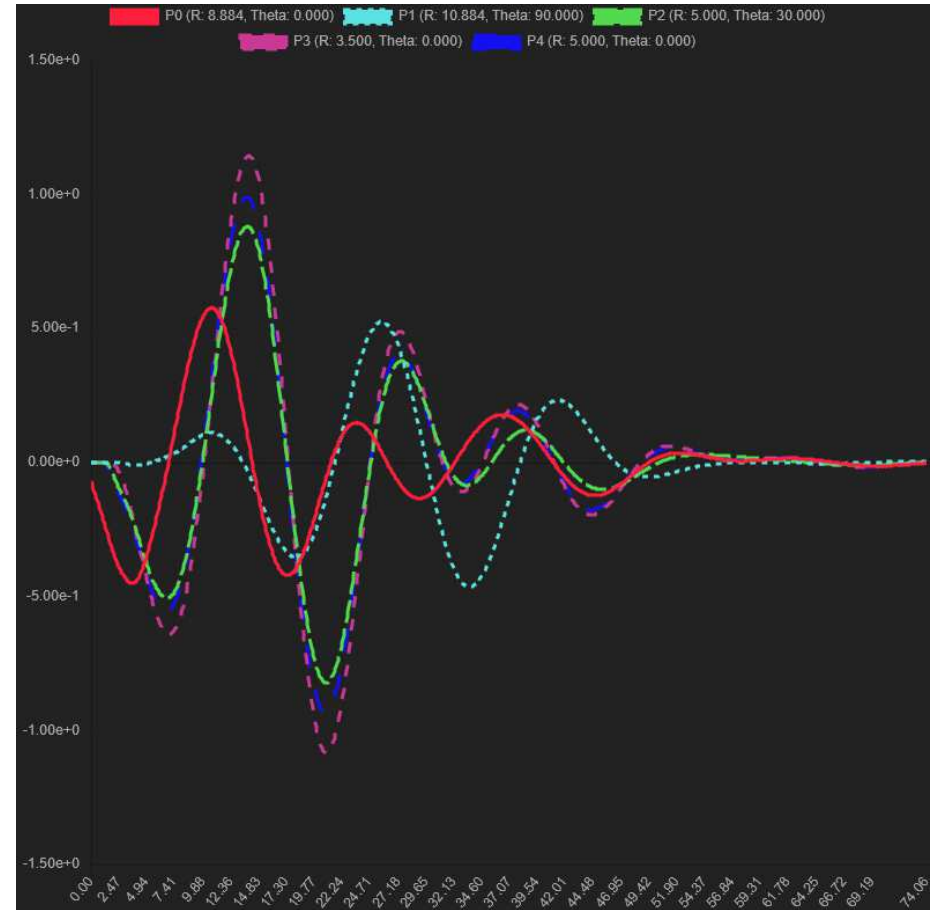


Рисунок 13 – Проекция скоростей смещения грунта v_1 (по горизонтальной оси время, мс; по вертикальной оси скорость смещения, м/с)

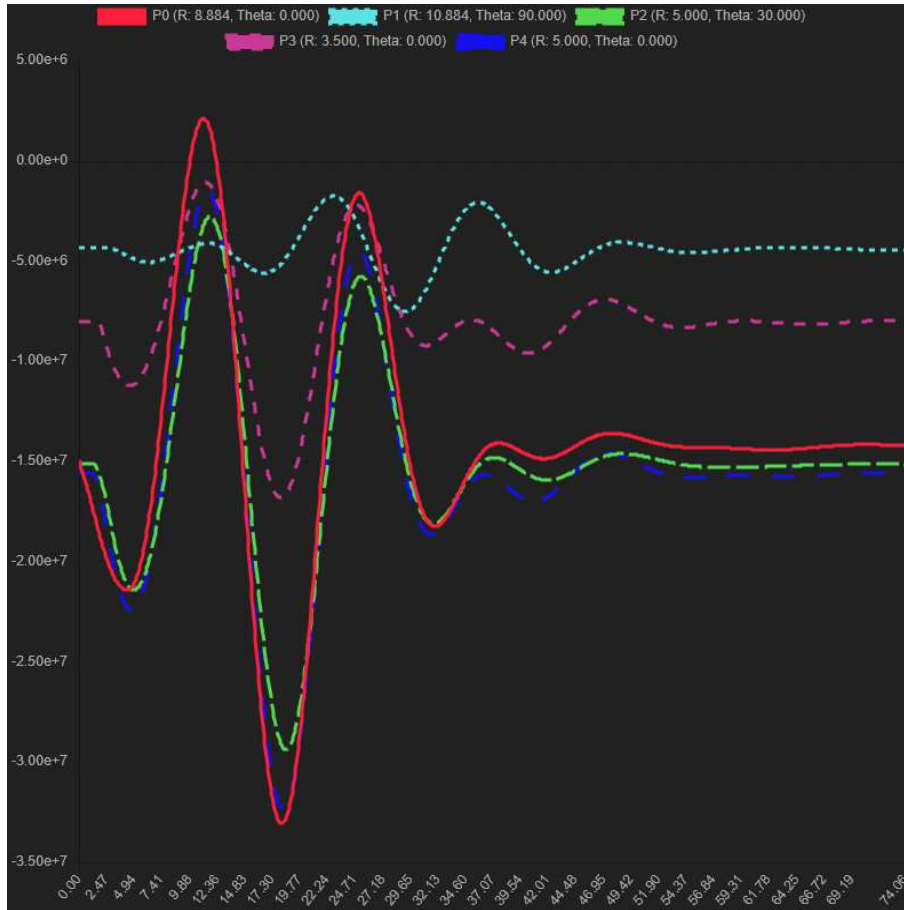


Рисунок 14 – Проекция σ_{11} (по горизонтальной оси время, мс; по вертикальной оси напряжение, Па)

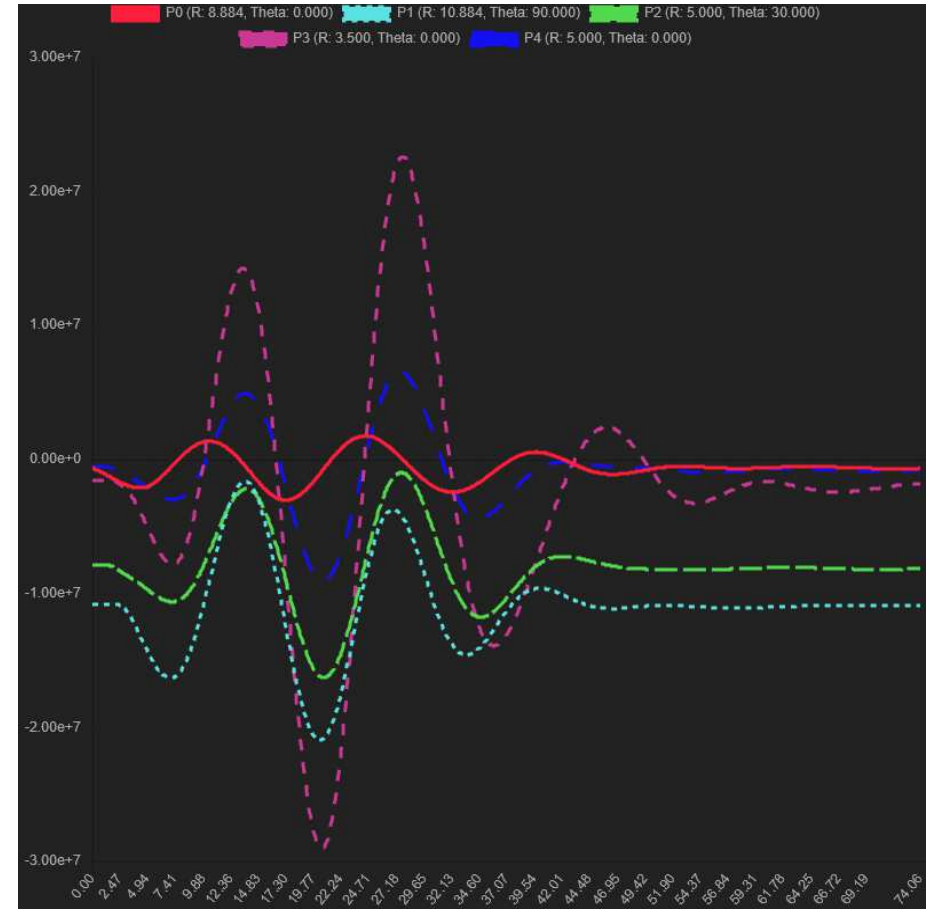


Рисунок 15 – Проекция σ_{22} (по горизонтальной оси время, мс; по вертикальной оси напряжение, Па)